



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PŘENOS TEPLA V ÚLOŽNÉM OBALOVÉM SOUBORU A JEHO VLIV NA OKOLÍ

HEAT TRANSFER IN THE STORAGE CASK AND ITS IMPACT ON THE ENVIRONMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN MARCELL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH MATAL, CSc.

BRNO 2009

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je řešení problematiky týkající se přestupu tepla v úložném obalovém souboru pro vyhořelé jaderné palivo. V první části jsou zhodnoceny způsoby koncepčního řešení úložných obalových souborů jednotlivých států. Na základě tohoto byla pro výpočet zjednodušeného modelu vybrána varianta uvažovaného projektu hlubinného úložiště v České republice.

Druhou částí je výpočtové řešení, které bylo rozděleno na dvě části. Ta první se týká výpočtu přestupu tepla v úložném obalovém souboru a je provedena analytickou metodou. V části druhé je výpočet koncipován numerickým modelem. Tímto způsobem je analyzována oblast v blízkém okolí tohoto modelu úložného obalového souboru.

Poslední část této práce se týká navržení ukládacích roztečí mezi úložnými obalovými soubory a také optimální umístění v podzemní části hlubinného úložiště.

Summary

The main object of this diploma thesis is solving problems concerning heat transfer in disposal canister for spent nuclear fuel. In forepart possibilities of conceptual solving according of disposal canister to particular states are reviewed. On the basis of this a variant of possible protect of a nuclear fuel repository in the Czech republic has been chosen for calculation of a simplified model.

Second part is computational solving that was divided into two parts. The first deals with calculation of heat transfer in disposal canister and is done by an analytical method. In the second part is calculation is done by numerical model. In this way region in near surroundings of this model of disposal canister is analysed.

Last part those diploma thesis deals with design of the storage of spacing among disposal canisters as well as optimum placing in underground part of nuclear fuel repository.

Citace

MARCELL, J. *Přenos tepla v úložném obalovém souboru a jeho vliv na okolí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 80 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních zdrojů a informací, které cituji v seznamu použité literatury. Tato práce není duplikátem jiného díla a vytvořil jsem ji pod dohledem mého vedoucího práce s použitím uvedených referencí.

V Brně dne 25.5.2009

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Oldřichu Matalovi, CSc. a také Ing. Hugo Šenovi za zájem, připomínky a čas, který věnovali mé práci. Také bych chtěl poděkovat svým rodičům a hlavně mé přítelkyni, že to se mnou v tomto období přežila ve zdraví.

Obsah

Abstrakt	5
Summary.....	5
Citace	6
Čestné prohlášení.....	6
Poděkování	6
Obsah.....	7
1 Úvod.....	11
2 Vyhořelé jaderné palivo.....	12
2.1 Palivový cyklus	12
2.1.1 Přední část PC (front-end)	12
2.1.2 Činná část PC	13
2.1.3 Zadní část PC (back-end)	13
2.1.4 Uzavřený palivový cyklus.....	13
2.1.5 Otevřený palivový cyklus.....	13
3 Hlubinné ukládání VJP v ČR a zahraničí	14
3.1 Co je to ÚOS ?	14
3.2 Česká republika	14
3.2.1 Nakládání s radioaktivními odpady	14
3.2.2 Koncepce HÚ	14
3.2.3 Koncepce ÚOS	15
3.3 Finsko.....	18
3.3.1 Nakládání s radioaktivními odpady	18
3.3.2 Koncepce HÚ	18
3.3.3 Koncepce ÚOS	19
3.4 Dílčí závěr.....	22
4 Varianty ukládání ÚOS.....	23
4.1 Koncept 1.....	24
4.1.1 Charakteristika.....	24
4.1.2 Hlavní prvky konceptu	24
4.1.3 Důležité aspekty	24
4.2 Koncept 2	26

4.2.1	Charakteristika.....	26
4.2.2	Hlavní prvky konceptu	26
4.2.3	Důležité aspekty	26
4.3	Koncept 3	28
4.3.1	Charakteristika.....	28
4.3.2	Hlavní prvky konceptu	28
4.3.3	Důležité aspekty	28
4.4	Koncept 4	30
4.4.1	Charakteristika.....	30
4.4.2	Hlavní prvky konceptu	30
4.4.3	Důležité aspekty	30
4.5	Koncept 5	31
4.5.1	Charakteristika.....	31
4.5.2	Hlavní prvky konceptu	31
4.5.3	Důležité aspekty	31
4.6	Koncept 6	33
4.6.1	Charakteristika:	33
4.6.2	Hlavní prvky konceptu	33
4.6.3	Důležité aspekty	33
5	Řešená soustava	35
6	Přestup tepla v ÚOS a jeho vliv na okolí	36
6.1	Zvolená alternativa ÚOS pro výpočet	36
6.1.1	Popis hlavních částí ÚOS.....	37
6.2	Základy teoretického výpočtu	37
6.2.1	Fourierův zákon	37
6.2.2	Zjednodušená diferenciální rovnice energie	37
6.3	Zjednodušený model výpočtu ÚOS VVER 440	39
6.3.1	Geometrické zjednodušení.....	39
6.3.2	Zjednodušující předpoklady	41
6.4	Analytický výpočet přestupu tepla	41
6.4.1	1D teplotní profil válci s vnitřním zdrojem	41
6.4.2	1D teplotní profil ve válcové stěně bez vnitřního zdroje	43

6.4.3	Výpočet teplot v hraničních bodech.....	44
6.4.4	Výpočet středních teplot.....	47
6.5	Změna teploty na povrchu ÚOS	49
6.5.1	Změna pomocí tepelného výkonu Q	49
6.5.2	Změna teploty pomocí parametru Δ_i	52
6.5.3	Změna teploty pomocí součinitele tepelné vodivosti λ	52
6.6	Numerický model přestupu tepla	53
6.6.1	Charakteristika programu Star-CCM++	54
6.6.2	3D model	55
6.6.3	Vytvoření simulace a modelu	55
6.6.4	Modelový prostor.....	56
6.6.5	Okrajové podmínky	58
6.6.6	Fyzikální modely	58
6.6.7	Hraniční podmínky	59
6.6.8	Parametry výpočtu	59
6.6.9	Teplotní profil.....	60
6.7	Dílčí závěr.....	65
7	Návrh rozteče mezi dvěma ÚOS	66
7.1.1	Minimální doba skladování VJP před uložením do HÚ.....	66
7.1.2	Změna rozteče mezi dvěma ÚOS v závislosti na tepelném výkonu a způsobu utěsnění vrtu	66
8	Optimalizace umístění ÚOS v podzemní části HÚ	70
8.1	Varianta 1	70
8.1.1	Teplotní profil.....	70
8.2	Varianta 2	72
8.3	Porovnání vertikálního a horizontálního ukládání ÚOS.....	73
8.4	Porovnání množství objemu vyrubané horniny.....	74
8.5	Dílčí závěr.....	75
9	Závěr	76
9.1	Diskuze k přestupu tepla v ÚOS.....	76
9.2	Diskuze k numerickému modelu	76
9.3	Diskuze k návrhu rozteče.....	77

Seznam použité literatury	78
Zkratky	79
Seznam symbolů	80

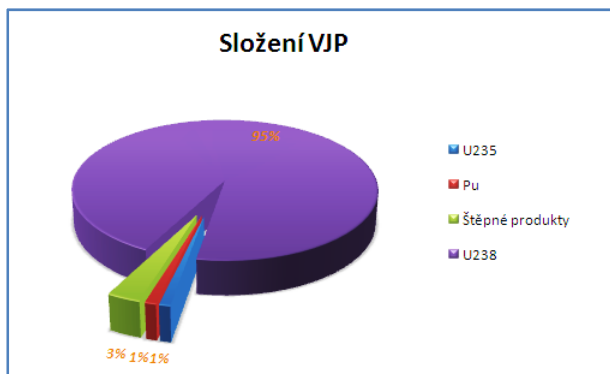
1 Úvod

Vyhořelé jaderné palivo (dále jen VJP) a nakládání s ním, je v dnešní době problém každé země využívající jadernou energii. VJP vzniká jako vedlejší produkt při provozu jaderně-energetických a výzkumných reaktorů. VJP může být v podstatě díky procesu přepracování a transmutačním technologiím dále významným zdrojem energie. Dle dikce atomového zákona v ČR *"do doby, než vyhořelé nebo ozářené jaderné palivo jeho původce nebo Úřad prohlásí za radioaktivní odpad, se na nakládání s ním, kromě požadavků vyplývajících z jiných ustanovení tohoto zákona, vztahují také požadavky jako na radioaktivní odpady. Vlastník vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva je povinen nakládat s ním tak, aby nebyla ztížena možnost jeho další úpravy"* (§ 24 odst. 3). [1]

„Vzhledem k vysokým aktivitám a značnému obsahu dlouhodobých radionuklidů se v současné době předpokládá uložení (tj. trvalé umístění) VJP v hlubinných geologických formacích, i když technologie jeho úpravy jsou ve světě zvládnuty a jsou průmyslově využívány v závodech na přepracování VJP (Francie, Japonsko, Rusko, Velká Británie). Po etapě skladování bude proto VJP převezeno do plánovaného hlubinného úložiště, kde bude přebaleno do úložných obalových souborů (dále jen ÚOS) a uloženo. Dlouhodobé skladování a navazující uložení VJP v hlubinném úložišti je dle Vládou schválené "Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR" považováno za základní národní strategii v oblasti nakládání s VJP. Na druhou stranu realizace skladů VJP umožňuje zaujmout vyčkávací pozici a v závislosti na budoucích podmínkách palivo buď přepracovat, nebo využít nově vyvíjené technologie. I v případě zavedení těchto technologií budou ale dále existovat vysoceaktivní odpady, které bude nutné uložit v hlubinném úložišti“. [1]

2 Vyhořelé jaderné palivo

Jak už bylo uvedeno v předchozí části, může být VJP nadále významným zdrojem energie pro použití v jaderně-energetických zařízeních. Vyhořelé palivo obsahuje 1% U235, 1% Pu a 3% štěpných produktů. Právě tyto 3% jsou nebezpečné, vysoceradioaktivní emitující všechny druhy záření. Zbylých 95% VJP je neškodný U238. [8]



Obr. 2-1: Koláčový graf zobrazující procentuální složení VJP

„V současné době již existují technologie na zpracování vysoceradioaktivních odpadů z jaderných elektráren chemickou cestou. V USA je také známa technologie ADTT, jejímž principem je převod paliva do formy tekutých solí, jež jsou bombardovány neutrony a tak štěpeny radioaktivními prvky za současné výroby energie. Tyto technologie také nejsou bezodpadové. Zbytky z přepracování je třeba izolovat a zatavit do skla. Avšak vzhledem ke světovým cenám uranu a cenám tohoto procesu je jen málo zemí, které si mohou takovou cestu zpracování odpadů dovolit. Dalším dost důležitým argumentem, který celkovou kalkulaci narušuje, je, že i vyhořelé palivo může být v budoucnu rozumně využito. V současnosti je jen asi 10% VJP z jaderných reaktorů přepracováno“. [8]

Způsoby nakládání s VJP budou popsány tzv. palivovými cykly. Co to palivový cyklus je, jaké jsou jeho části a jak se rozděluje, bude popsáno v následujících kapitolách.

2.1 Palivový cyklus

Palivový cyklus (dále jen PC) představuje souhrn všech činností od těžby přírodních zdrojů přes jeho energetické využití až po nakládání s použitým jaderným palivem. PC se v podstatě dělí na přední, činnou a zadní část.

2.1.1 Přední část PC (front-end)

Dle [3] do přední části palivového cyklu spadají tyto činnosti:

- těžba uranové rudy
- mechanická a chemická úprava rudy => žlutý koláč U_3O_8
- chemické procesy rafinace a konverze na fluorid uranový – UF_6
- obohacování uranu
- zpětná konverze UF_6 na kovový uran nebo na UO_2
- výroba kompletních palivových článků pro jaderný reaktor

2.1.2 Činná část PC

Týká se veškerých činností spojených s energetickým využitím paliva v jaderném reaktoru.

2.1.3 Zadní část PC (back-end)

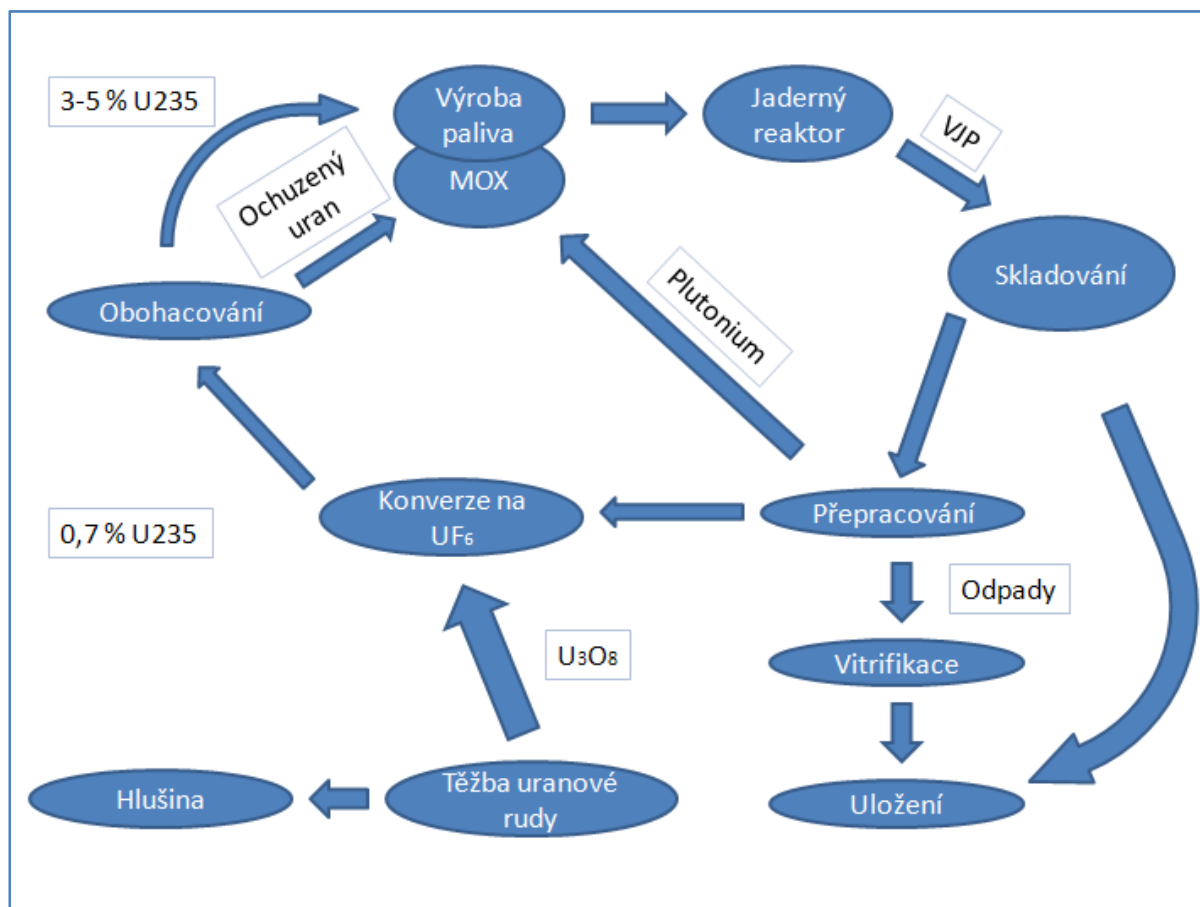
Do této části spadají všechny činnosti týkající se nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Podle způsobu nakládání s VJP se PC dále rozděluje na otevřený nebo uzavřený.

2.1.4 Uzavřený palivový cyklus

VJP je považováno za zdroj energie a je dále využíváno. Uzavřený PC vede k přepracování paliva. Přepracování paliva je v této době technologicky zvládnutý, ale přesto velmi složitý a finančně náročný proces.

2.1.5 Otevřený palivový cyklus

Je takový PC, kdy se VJP nepovažuje za zdroj energie a dále se nezpracovává. Uvažuje-li se hlubinné ukládání VJP pak bude PC probíhat přibližně následujícím způsobem VJP se po skončení kampaně přesune do bazénu pro VJP, kde se skladuje přibližně 3 až 5 let. Poté se VJP přesune do příslušného kontejneru a ten dále do meziskladu VJP a nakonec do skladů VJP. Ve skladu VJP se palivo bude skladovat přibližně 40 až 50 let. Po uplynutí této doby se odtud dopraví do nadzemní části hlubinného úložiště (HÚ). Zde dojde k přeložení VJP z kontejneru do příslušného úložného obalového souboru (ÚOS) pro hlubinné uložení. Zjednodušené zobrazení možného PC je na obr. 2-2.



Obr. 2-2: Jedna z možných variant zobrazení PC [3]

3 Hlubinné ukládání VJP v ČR a zahraničí

V této části diplomové práce bude definován ÚOS a porovnány koncepční varianty ÚOS v ČR a zahraničí.

3.1 Co je to ÚOS ?

Úložný obalový soubor, je vlastně hermetické pouzdro obsahující VJP, které bude zatíženo vnějším přetlakem, zvýšenou teplotou a ionizujícím zářením. Vždy musí plnit funkci fyzické bariéry proti úniku radioaktivních látek do okolního prostředí. Při tomto zatížení se musí zajistit dlouhodobá ochrana vnějšího přebalu ÚOS v okolním prostředí (vlhký bentonit). Technické řešení je možno provést mnoha způsoby a jeho vývoj v současné době probíhá ve světě různými směry. [8]

3.2 Česká republika

3.2.1 Nakládání s radioaktivními odpady

Převzato z [5].

„Vláda ČR schválila dne 15. 5. 2002 dokument nazvaný Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR. Nakládání s radioaktivními odpady v ČR bude probíhat podle dlouhodobé strategie. Vládní dokument předpokládá vybudování hlubinného úložiště“.

„Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) jakožto subjekt, který z pověření státu odpovídá za bezpečné ukládání radioaktivních odpadů na území ČR, koncepci velmi vítá. Koncepce je SÚRAO považována za stěžejní strategický dokument, který vytváří základní rámec pro všechny činnosti, které SÚRAO vykonává. Povaha práce SÚRAO vyžaduje, aby existoval určitý dlouhodobý výhled, kterému by jednotlivé kroky nakládání s radioaktivními odpady byly podřízeny“.

„Koncepce doporučuje pokračovat v dosavadní praxi ukládání nízko a středně aktivních odpadů do stávajících přípovrchových úložišť (Richard u Litoměřic, Bratrství u Jáchymova a Dukovany) provozovaných SÚRAO“.

„Pro vysoceaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo bude podle tohoto vládního dokumentu připravováno hlubinné úložiště, jehož zprovoznění se předpokládá kolem roku 2065. Až do té doby bude vyhořelé palivo z jaderných elektráren skladováno v transportně-skladovacích kontejnerech umístěných v samostatných skladech vybudovaných přímo v areálech obou jaderných elektráren“.

„Koncepce dále říká, že bude dále sledován a podporován rozvoj nových technologií, které by v budoucnosti mohly umožnit využití vyhořelého jaderného paliva například v novém typu jaderných reaktorů“.

„Koncepce připomíná, že veškeré náklady na vyřazování jaderných zařízení a ukládání radioaktivních odpadů nesou provozovatelé těchto zařízení a původci radioaktivních odpadů. Stát prostřednictvím SÚRAO kontroluje a řídí tvorbu zdrojů vytvářených na speciálních vázaných účtech u bank či na jaderném účtu tak, aby byl zajištěn dostatek finančních prostředků na výše uvedené činnosti“. [4]

3.2.2 Koncepce HÚ

Převzato z [6].

„Byla zvolena varianta uložení nedemontovaného VJP ve svislých vrtech, velmi podobná Konceptu 1 (viz kapitola 4.1) . PK jsou hermeticky uzavřené v ocelovém pouzdře tzv. úložném obalovém souboru (ÚOS), který tvoří první z tzv. inženýrských bariér proti unikání radioaktivních materiálů do životního prostředí. ÚOS je vložen do vrtu a obložen těsnicím materiálem, který tvoří další bariéru“.

Způsoby možného ukládání ÚOS v podzemní části HÚ budou blíže diskutovány v kapitole 4.

„Uložení ve svislých studních umožňuje snadnější technologické operace při ukládání ÚOS a poměrně jednoduchou ochranu obsluhy proti ozáření. Nevýhodou jsou nákladnější důlní práce - větší objemy vyrubaného materiálu“.

„Ukládáním nedemontovaného VJP se operace s PK v horké komoře omezily na minimum. Tím se podstatně snížily nároky na technologické vybavení a na rozměry horké komory. Jednoduchost operací uvnitř horké komory snižuje také pravděpodobnost poruch a závad na strojním zařízení při manipulaci s palivem. Nevýhodou je větší délka ÚOS a tím potřeba větších profilů ukládacích chodeb. Tato nevýhoda by se ovšem téměř neprojevila při horizontálním ukládání, kdy délka ÚOS nemá vliv na profil chodby“.

„Ukládací prostor pro VJP bude umístěn v granitovém masívu v hloubce 500 m a je řešený jako jednoúrovňový komplex. Bude tvořen rovnoběžnými páteřními chodbami, z nichž budou vycházet kolmo tzv. ukládací chodby. V ukládacích chodbách budou provedené svislé vrty, do nichž budou uloženy ÚOS s VJP. Vrty budou umístěny pouze v jedné řadě a v každém z nich bude uložen pouze jeden ÚOS s VJP. ÚOS budou ve vrtech utěsněny bentonitem a betonovými zátkami. Rozteč mezi jednotlivými vrty je 5 m pro VJP VVER 440 i VVER 1000“.

3.2.3 Koncepce ÚOS

Čerpáno z [6].

ÚOS se skládá ze dvou hlavních částí a to z vnitřního pouzdra a vnějšího přebalu s ochranným antikorozním povlakem na vnějším povrchu přebalu.

Tento povlak chrání vnější přebal ÚOS okamžitě po uložení, kdy je větší intenzita napadání povrchu ÚOS vlivem přítomnosti okysličené atmosféry, vyšší radiace, teploty a nestabilních podmínek. Toto řešení by umožnilo vyrobít vnější přebal ÚOS z uhlíkové oceli bez větších přísad na korozní úbytek materiálu. Výhodou je také menší spotřeba materiálu a minimální spotřeba barevných kovů. Zhotovení antikorozního povlaku bude provedeno metodou vysokotlakého supersonického nástřiku, který umožňuje provedení povlaků na bázi kovů, kovokeramických materiálů a neoxidické keramiky. V referenčním provedení se uvažuje kovový materiál NiCr 80/20 s velmi nízkým obsahem oxidů a vysokou pevností spojení se substrátem.

Vnitřní pouzdro je provedeno z nerezové oceli ČSN 17.248. Plášť pouzdra je zkroužen z plechu tloušťky 5 mm a je k němu přivařená ploché dno. Uvnitř pouzdra je vestavba ze slitiny hliníku AlMgSi 0,5, která je zhotovená ze 7 (ÚOS pro PK VVER 440) nebo tří (ÚOS pro PK VVER 1000) profilových trubek. Vestavba slouží k fixaci polohy zavezených palivových kazet a usnadňuje jejich vkládání. Také vytváří lůžka pro PK, zlepšuje přestup tepla a fixuje polohu PK z hlediska natáčení v tolerancích nutných pro spolehlivou funkci zachytu. Vnitřní pouzdro je hermeticky uzavřeno přivařením víka k jeho plášti. Je opatřeno manipulačním záchytem, ve kterém, je umístěn ventil umožňující vyvacování vnitřního prostoru pouzdra a jeho naplnění heliem. Toto plnění se provádí z důvodu těsnicí zkoušky vnitřního pouzdra.

Před uložením se v pouzdře ponechá tlak He na úrovni atmosferického tlaku, aby byla v pouzdře zajištěna inertní atmosféra.

Vnitřní pouzdro je zasunuto do vnějšího přebalu z uhlíkové oceli No 1.6338 (WB 36), jehož plášť tvoří trubka o \varnothing 650x54,5 mm (ÚOS pro PK VVER 440) nebo \varnothing 700x54,5 mm (ÚOS pro PK VVER 1000). K níž je hermeticky přivařeno silnostěnné dno a víko. Hermetičnost svarů se kontroluje heliovou zkouškou. Tak jako u vnitřního pouzdra je přebal opatřen manipulačním záchytem a ventilem umožňujícím vyvakuování vnitřního prostoru pouzdra a jeho naplnění heliem z důvodu těsnicí zkoušky. Před uložením se prostor mezi vnitřním pouzdrem a vnějším přebalem vyplní dusíkem o přetlaku 0,05 MPa. Ten v tomto prostoru zaručí suché prostředí a zabráni úniku He z vnitřního pouzdra. Po naplnění se utěsní prostor ventilu přivařením víčka.

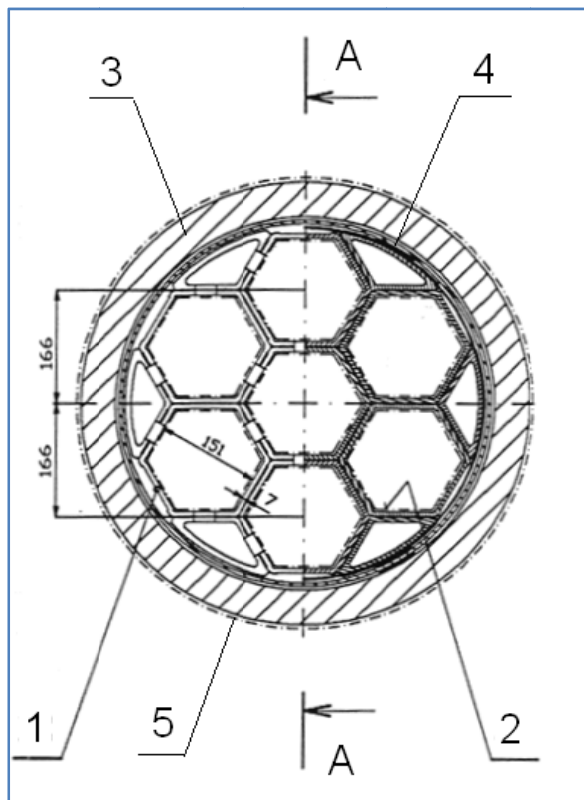
„Návrhy vycházejí ze současných zkušeností s materiály a technologiemi. Pro další vývoj konstrukce pouzder bude nutné hledat nové vhodnější materiály a technologie, provést ověřovací zkoušky a výpočty. Rovněž konečná volba materiálu a provedení ochranného povlaku může být provedena na základě výsledků dlouhodobého experimentálního programu“. [5]

Jak už bylo zmíněno, jsou v [8] navrženy dva typy ÚOS. Pro ukládání palivových kazet z JE Dukovany a JE Temelín. ÚOS pro PK z JEDU (Jaderná elektrárna Dukovany) je určen pro 7 PK šestiúhelníkového profilu. ÚOS pro PK z JETE (Jaderná elektrárna Temelín) je určen pro 3 PK šestiúhelníkového profilu. V následující tabulce 3-1 jsou uvedeny základní parametry obou typů ÚOS a JP.

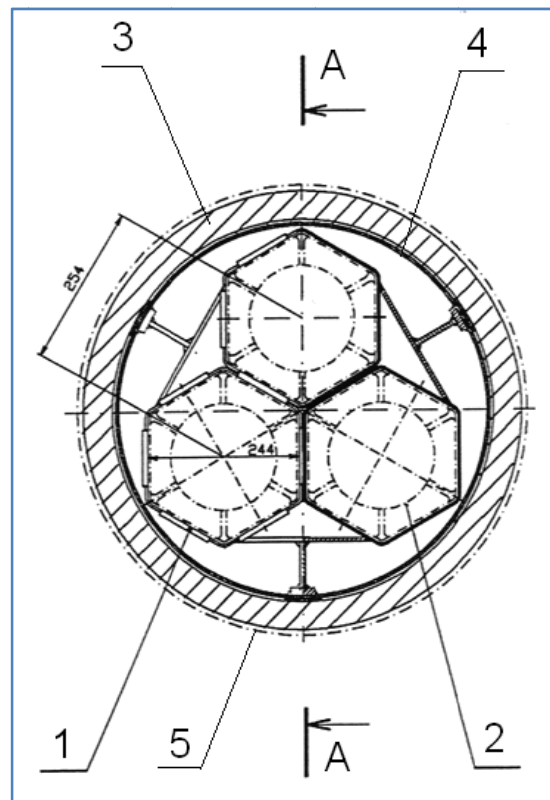
Tab. 3-1: Základní parametry ÚOS pro V JP, Koncepce ČR [6] [7]

	ÚOS pro VVER 440	ÚOS pro VVER 100
Počet uložených palivových kazet	7	3
Typ paliva	UO ₂	UO ₂
Typické obohacení paliva – U235 [%]	3 – 5 %	3 – 5 %
Předpokládaný stupeň vyhoření paliva	45 000 MWd/tU	48 000 MWd/tU
Předpokládaná doba skladování PK	65 let	65 let
Hodnocení podkritičnosti	Burn-up credit $K_{ef} = 0,95$	Burn-up credit $K_{ef} = 0,95$
Stav paliva	Celá palivová kazeta	Celá palivová kazeta
Mechanické zatížení	20 MPa	20 MPa
Maximální teplota okolního prostředí	100°C	100°C
Hmotnost bez VJP	3500 kg	5430 kg
Hmotnost s VJP	5000 kg	7700 kg
Rozměry	\varnothing 650 x 3670 mm	\varnothing 700 x 5050 mm

Na následujících obrázcích 3-1 a 3-2 jsou uvedeny příčné řezy obou typů ÚOS. Na obrázku 3-3 je příčný řez ukládacím hnízdem s jedním ÚOS VVER 1000.

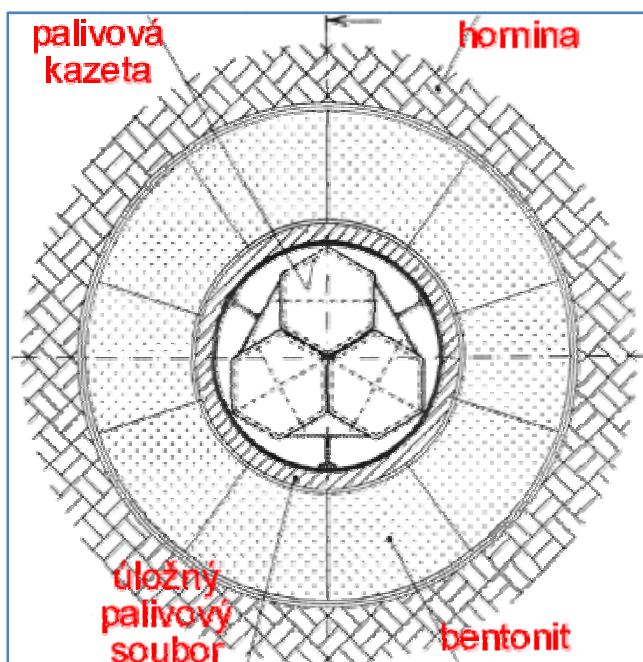


Obr. 3-1: ÚOS pro PK z VVER 400 (příčný řez) [7]



Obr. 3-2: ÚOS pro PK z VVER 1000 (příčný řez) [7]

1 - Vestavba vnitřního pouzdra, 2 - PK VVER 440(obr. 3-1), PK VVER 1000(obr. 3-2), 3 - Vnější přebal, 4 - Vnitřní pouzdro, 5 - Antikoroziční povlak NiCr 80/20



Obr. 3-3: Zobrazení ukládacího hnízda s ÚOS pro VVER 1000 [4]

3.3 Finsko

3.3.1 Nakládání s radioaktivními odpady

Převzato z [11].

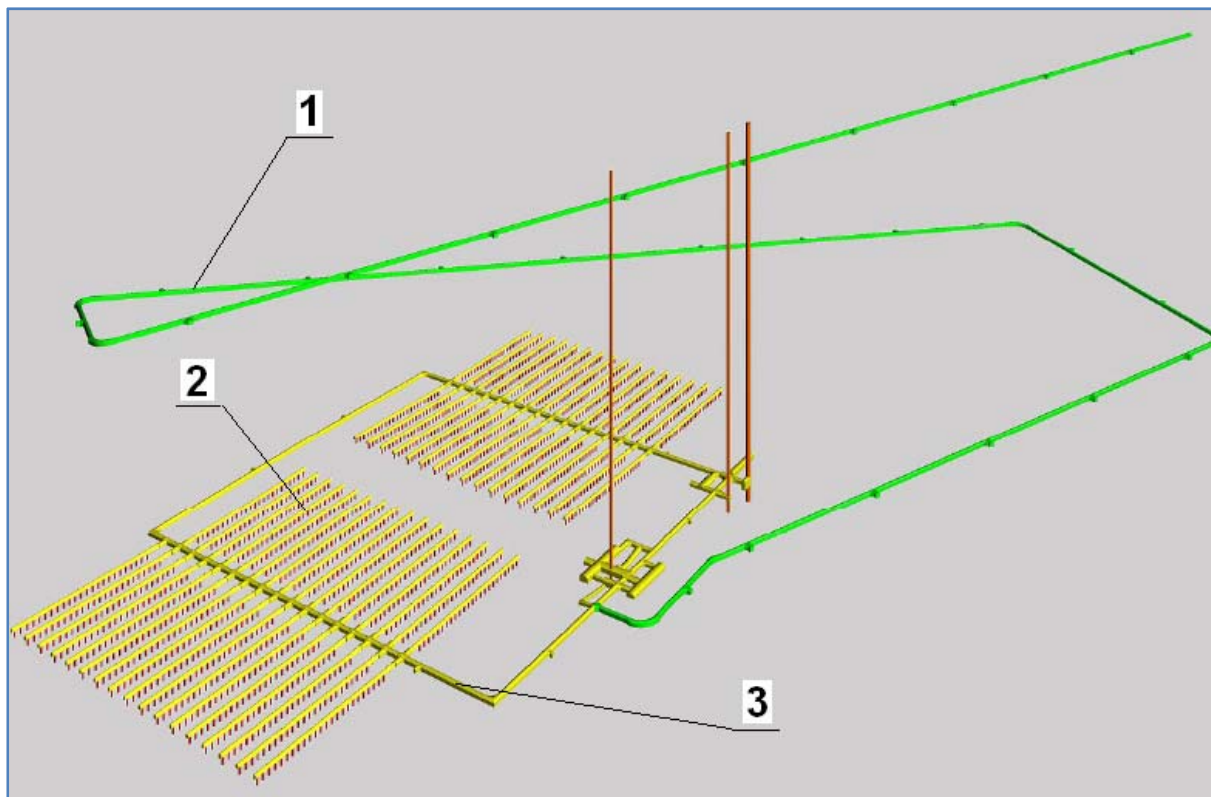
„Organizace POSIVA, která má ve Finsku na starost nakládání s radioaktivním odpadem, vypracovala návrh na výstavbu nového hlubinného úložiště. Finská koncepce zneškodňování vyhořelého jaderného paliva je založena na jeho přímém umístění do geologického úložiště jaderného odpadu vybudovaného v granitoidní horninové formaci, v hloubce přibližně 500 metrů pod povrchem. V současné době se uvažuje o ukládání VJP (vyhořelého jaderného paliva) do ÚOS (úložných obalových souborů) vyrobených z litiny s kuličkovým grafitem a uzavřených do vodotěsné obálky z mědi. Tyto ÚOS mají být vkládány do vertikálních bentonitových loží. Současná koncepce ÚOS má tři verze, jednu pro každý typ reaktoru provozovaných ve Finsku“.

„Finský jaderný program je svým rozsahem a zvažovanou hostitelskou horninou blízký českému, ale liší se časovým plánem jeho realizace: žádost o stavební povolení má být podána v roce 2010, úložiště by mělo vstoupit do provozní fáze o cca 10 let později“.

„V květnu 1999 podepsala POSIVA kontrakt s obcí Eurajoki poblíž Olkiluota, kde byl proveden intenzivní hlubinný geologický průzkum. Výstavba konfigurační podzemní laboratoře ONKALO byla zahájena přípravnými pracemi v roce 2003“.

3.3.2 Koncepce HÚ

3D pohled na koncepci finského hlubinného úložiště je na obr. 3-5.



Obr. 3-4: 3D pohled na podzemní část HÚ – Finsko, lokalita Olkiluoto [10]

1- Tunel pro dopravu ÚOS do podzemní části HÚ, 2 – Tunely pro ukládání ÚOS, 3 – Chodba vedoucí k ukládacím tunelům

Převzato z [9].

„Vlastní úložiště sestává z několika tunelů vzdálených od sebe 25 m a spojených transportními chodbami. Kromě šachty sloužící pro transport kontejnerů je úložiště spojeno s povrchovými objekty pracovní šachtou a šachtou pro přepravu osob. Po umístění jsou kontejnery obklopeny montmorillonitickým jílem, jenž ve styku s podzemní vodou zvětšuje objem, a tím uzavře většinu netěsností v bariérovém systému. Po uzavření nebude úložiště vyžadovat žádný monitoring. Odhad nákladů na vybudování úložiště je 4,3 miliardy FIM. Požadovaná suma je již k dispozici (byla započtena v ceně vyrobené elektrické energie). V úložišti bude zaměstnáno cca 100 pracovníků jako provozní personál, ve službách, při monitorování a v administrativě. Projekt úložiště má být hotov asi za 10 let a zaměstnává rovněž okolo 100 osob“.

„Transport vyhořelého paliva se předpokládá zajišťovat po silnici nebo po železnici. Možná je rovněž přeprava po moři“.

3.3.3 Koncepce ÚOS

Čerpáno z [10].

Základní návrhové požadavky pro finskou koncepci ÚOS pro VJP jsou následující:

ÚOS nesmí být infiltrován korozí během prvních 100000 let po jeho uložení v očekávaných podmínkách úložiště.

Maximální intenzita dávky na vnějším povrchu ÚOS musí být nižší než 1 Gy/h, to proto, aby se minimalizovala radiolýza vody nebo změna bentonitové výplňové vrstvy na vnější straně ÚOS.

ÚOS musí být pod-kritický i kdyby prázdný prostor uvnitř ÚOS byl vyplněný vodou. Pod-kritičnost je třeba kontrolovat pro jeden ÚOS a pro sadu ÚOS v povrchové části továrny pro zapouzdření ÚOS. Dále pak v úložných hnízdech podzemní části úložiště.

Teplota na povrchu ÚOS v podmínkách podzemní části úložiště nesmí přesáhnout 100°C, aby bylo zaručeno, že na povrchu ÚOS nedojde k varu solné lázně, spojeného s atmosférickým tlakem a chemickou stabilitou okolního bentonitu.

ÚOS bude navržen tak, aby odolával zatížení, jež je způsobeno uložením v hloubce 400 až 700m, které může způsobit rovnoměrné rozdělení zatížení a to 7 MPa hydrostatického tlaku od podzemní vody a 7 MPa tlaku od napučání bentonitu.

Pevnost ÚOS bude demonstrována v nesymetrickém tvaru napuchaného bentonitu bez zahrnutí tlaku od podzemní vody a ve výplni s přidáním hydrostatickým tlakem 30 MPa.

Pevnost měděného přebalu má být kontrolována pro manipulace a nakládání s ÚOS během ukládacího procesu.

ÚOS nebude poškozovat funkci ostatních bariér v úložišti.

Zpětné získání ÚOS je zatím otevřené téma z důvodu, že by došlo k vývoji technologie, která by umožnila lepší nakládání s VJP.

Dle těchto základních požadavků byla navržena možná verze finského ÚOS. Ten se skládá ze dvou hlavních částí. Z vnitřního pouzdra vyrobeného z litiny s kuličkovým grafitem a vnějšího přebalu vyrobeného z mědi. Vnitřní pouzdro má jednotnou spodní část, nominální tloušťka, zahrnující spodní 15 mm ocelovou desku, zbytek je z litiny. Vnitřní pouzdro slouží jako nosná část nákladu (PK s VJP). Vnější přebal tvoří vodotěsnou obálku a má odolávat korozi. V referenčním modelu má vnější přebal nedílné ploché dno a na vrchní části je

přivařeno víko. Jiný model uvažuje, že spodní část přebalu bude mít víko přivařeno, obdobně jako část vrchní. Vrchní víko obsahuje rameno, za které bude ÚOS upnut manipulačním zařízením, během překládání a operací s tím spojených. Všechny povrchy vnějšího přebalu jsou obráběné.

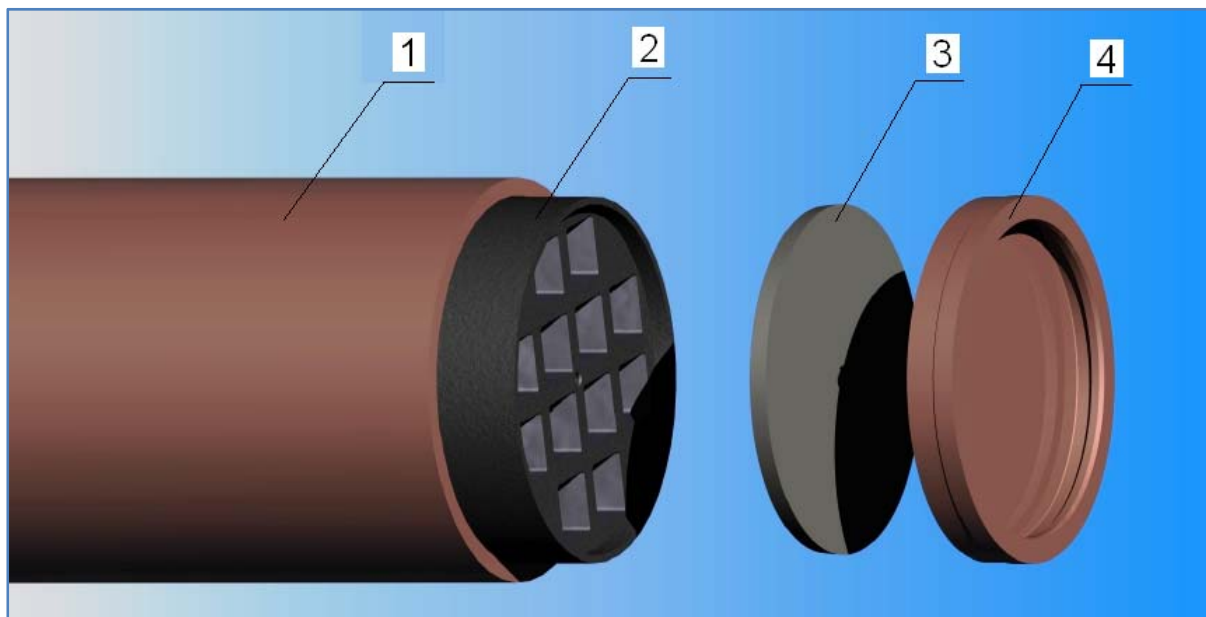
Finsko disponuje třemi typy jaderných reaktorů a to BWR, VVER 440 (západní koncepce) a EPR (momentálně ve fázi výstavby). Z toho plyne, že byly navrženy tři typy ÚOS pro VJP a to ÚOS pro PK z BWR (JE Olkiluoto, 1. a 2. blok), ÚOS pro PK z VVER 440 (JE Loviisa) a ÚOS pro PK z EPR (JE Olkiluoto, jako 3 blok). První typ ÚOS je určen pro 12 PK BWR čtvercového průřezu, druhý typ pro 12 PK VVER 440 šestiúhelníkového průřezu a ÚOS pro PK z EPR je pro 4 PK čtvercového průřezu. V tabulce 3-2 jsou zobrazeny základní parametry ÚOS a JP.

Tab. 3-2: Základní parametry ÚOS pro VJP, Finská koncepce - [10]

	ÚOS pro BWR	ÚOS pro VVER 440	ÚOS pro EPR
Počet uložených palivových kazet	12	12	4
Typ paliva	UO ₂	UO ₂	UO ₂
Předpokládaný stupeň vyhoření paliva	38000 – 39000 MWd/tU	39000 – 40000 MWd/tU	46000 – 47000 MWd/tU
Typické obohacení paliva - U235 [%]	3,3 – 3,8	3,6 – 4,0	3,6 – 4,2
Min. předpokládaná doba skladování PK	20 let	20 let	20 let
Hodnocení podkritičnosti	$K_{ef} < 1$	$K_{ef} < 1$	$K_{ef} < 1$
Stav paliva	Celá PK	Celá PK	Celá PK
Mechanické zatížení	30 MPa	30 MPa	30 MPa
Maximální teplota okolního prostředí	100°C	100°C	100°C
Hmotnost bez VJP	20737 kg	16075 kg	18000 kg
Hmotnost s VJP	24337 kg	18643 kg	26000 kg
Rozměry	Ø 1,05 x 4,8 m	Ø 1,05 x 3,6 m	Ø 1,05 x 5,25 m

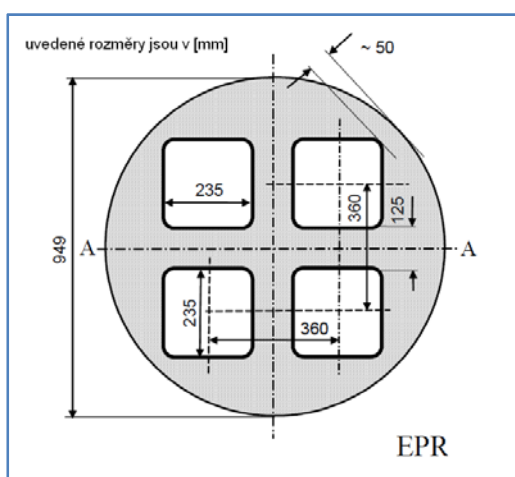
Hlavní rozměry všech tří typů ÚOS jsou shodné, vyjma jejich délky. Ta je závislá na délce zavezených PK. Komponentní zobrazení ÚOS pro BWR je na obr. 3-4.

Na obr. 3-5, 3-6, 3-7 jsou zobrazena rozdílná řešení vnitřních pouzder pro jednotlivé typy ÚOS. Na obr. 3-8 je zobrazen detail horní části vnitřního pouzdra.

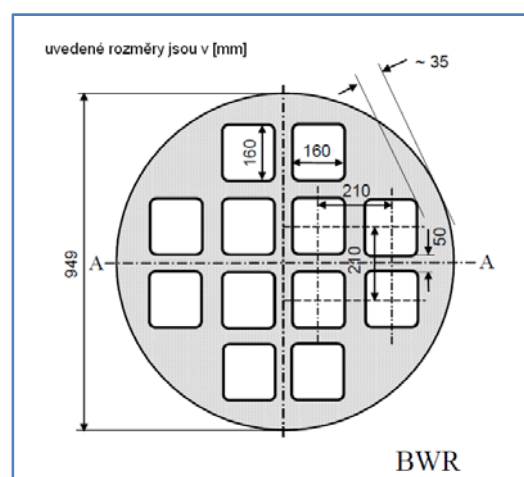


Obr. 3-5: Komponentní zobrazení ÚOS pro PK z BWR – [10]

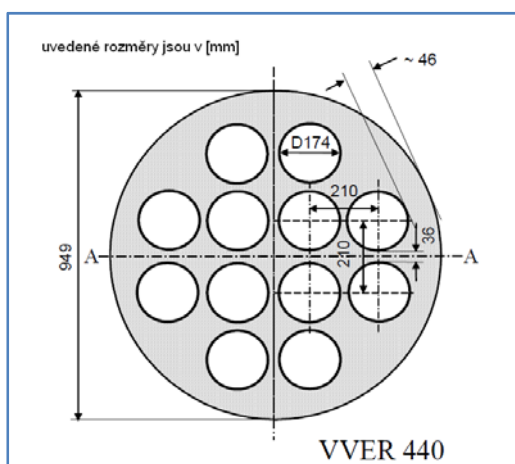
1- Vnější přebal, 2 – Vnitřní pouzdro, 3 – Víko vnitřního pouzdra, 4 – Víko vnějšího přebalu



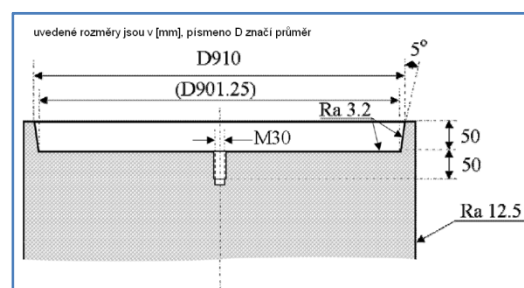
Obr. 3-6: Vnitřní pouzdro ÚOS EPR (příčný řez) - [10]



Obr. 3-7: Vnitřní pouzdro ÚOS BWR (příčný řez) - [10]



Obr. 3-8: Vnitřní pouzdro ÚOS VVER 440 (příčný řez) - [10]



Obr. 3-9: Detail horní části vnitřního pouzdra ÚOS - [10]

3.4 Dílčí závěr

Rešeršní část týkající se koncepčního řešení ÚOS byla provedena, pouze pro dva vybrané základní typy ÚOS a jejich varianty. Rozdílnost těchto dvou konceptů je zřejmá z tab. 3-1 a 3-2. Finský koncept ÚOS je v podstatě navržen pro větší počet PK (Případ VVER 440). Tepelný výkon těchto ÚOS se uvažuje 1370 W [10] (VVER 440), 1700 W [10] (BWR) a 1830 W [10] (EPR). Oproti uvažované variantě ÚOS pro VVER v ČR, kde se uvažuje výkon ÚOS pro VVER 440 při ukládání přibližně 525 W (skladování VJP po dobu 65 let). Na první pohled by se mohlo zdát, že ve finském konceptu se bude do HÚ umisťovat ÚOS s podstatně větším výkonem, tudíž i větším tepelným ovlivnění okolní zóny. To není zcela pravda. Výkon ÚOS při ukládání bude sice větší než konceptu ČR, avšak se předpokládá, že ÚOS budou mezi sebou vzdáleny o 10 m. Což je v prakticky dvojnásobná hodnota rozteče mezi dvěma ÚOS, než je uvažováno v konceptu ČR.

Přístup ke korozivní odolnosti je u každého konceptu ÚOS odlišný. V Českém řešení se uvažuje použití ÚOS s antikorozním nástřikem vnějšího přebalu. Varianta finského ÚOS bude vnější přebal vyrobený z mědi. Z tab. 3-2 je patrné, že díky tomuto uvažovanému řešení, bude finský ÚOS (pro srovnání uvažujeme ÚOS pro VVER) téměř o 15 tun těžší než český.

Z předešlého je patrné, že manipulace s finským ÚOS bude pravděpodobně technologicky i časově nákladnější, než v konceptu ČR.

4 Varianty ukládání ÚOS

Čerpáno z [11].

V této části bude pojednáváno o konkrétních variantách možného umístění ÚOS v podzemní části HÚ. Jejich výhody a nevýhody, původce, hlavní faktory a predikce do budoucna. Bylo vybráno 6 konceptů, které byly již dříve zhodnoceny a okomentovány v literatuře [11]. Každý koncept obsahuje popisnou část a jí příslušný obrázek možného způsobu uložení. Veškeré popisné informace každého konceptu jsou vždy rozděleny na tři hlavní části a to:

- Popis hlavních charakteristik konceptu, zejména materiálů použitých v inženýrských bariérách.
- Hlavní důvody (např. poruchy) na základě kterých byl příslušný koncept vyvinut a funkce jednotlivých komponent v multibariérovém systému.
- Důležitá hlediska, jako flexibilita nebo prostorový návrh velikosti podzemní části HÚ a z toho vyplývající výhody či nevýhody.

Jelikož se dosti často ve všech konceptech objevuje zkratka EDZ, bude následovat popis této zkratky a následně její význam.

EDZ (Excavation-Damaged Zone) – Vykopávkami porušená zóna:

Čerpáno z [21].

Např. jílové formace vykazují ve svém přirozeném stavu velmi příznivé podmínky pro ukládání radioaktivních odpadů. Aby bylo možno tyto odpady uložit, musí dojít k rozsáhlým vykopávkám v těchto formacích. Díky nim v jejich těsné blízkosti může dojít k případným poruchám, vedoucím k potlačení příznivých podmínek horniny v přirozeném stavu. V tomto stavu se hornina může stát nestabilní a může ztratit schopnost fyzickým bariér, které poskytuje. V podstatě přerozdělení napětí při těchto vykopávkách vede k vytvoření tzv. EDZ, např. v oblastech transportních tunelů, ukládacích chodeb nebo vertikálních úložných hnízdech. Toto přerozdělení napětí bude pravděpodobně řízeno počátečním napětím pole, materiálovými vlastnostmi (např. anizotropní materiál), přítomností přírodních lomových oblastí nebo nehomogenitami skalního masívu a samozřejmě také geometrickými parametry vykopaných oblastí.

Komplexní šetření v rozdílných lokalitách (HADES - Belgie, Mont Terri - Švýcarsko, Tournemire – Francie) ukázala, že EDZ se vyskytuje v měkkých nebo plastických jílech ve stejné míře, jako u zatvrdlých a křehkých jílovců. Je zřejmé, že pro pochopení všech probíhajících procesů, při vykopávkách, ražení tunelu, je nezbytné tyto situace adekvátně v daném prostředí namodelovat.

4.1 Koncept 1

4.1.1 Charakteristika

Odpad at' už VJP nebo HLW (high level waste – zbytky z přepracování JP) je uložen v krátkých vrtech o délce 6 – 8 m a průměru 0,6 – 1,5 m, vyvrtaných do podlahy v ukládacích chodbách viz obr. 4.1. Odpad je většinou uložen v ÚOS, který se dělí na dvě hlavní části a to korozně odolný měděný vnější přebal a vnitřní litinové pouzdro. Mezera tvaru anuloidu mezi ÚOS a hostitelskou horninou je vyplněna těsnícím materiálem bentonitem, který ÚOS izoluje a chrání. Převážně se užívá bentonit ve formě prefabrikátů nebo prášku.

4.1.2 Hlavní prvky konceptu

Koncept byl původně vyvinut pro ukládání VJP ve stabilním krystalovém masivu v rámci Švédské studie KBS v 80. letech. Vertikální ukládací vrty byly vyvinuty jako odezva na rozsah a vlastnosti EDZ v oblasti ukládacího tunelu. Není jisté, zda bude EDZ poskytovat dobrou dlouhodobou kontrolu. Díky vzájemné pórovitosti a mezerovitosti by totiž mohlo dojít při větších hodnotách vodního toku k tomu, že tento tok obejde přírodní bariéru a dostane se až do těsnicí vrstvy, případně k ÚOS. Cílem vertikálních vrtů je izolace jednotlivých ÚOS a dále jejich umístění mimo ukládací chodbu (v podstatě dále od EDZ).

Při použití měděného nebo titanového ÚOS, je zaručena dlouhodobá ochrana před korozivním prostředím v ukládacím vrtu s uvažování IRF (Instant release fracture – okamžité uvolnění frakce) radionuklidu, který se nachází v mimo část UO_2 matrice nebo Zirkoniový povlak a může být z ÚOS uvolňován impulzně. Tento proces není možné značně zmírnit, kvůli chemickým vlastnostem těchto radionuklidů (např. velmi vysoká rozpustnost a nízká sorpce) a hydrogeologických vlastností a zeměžpytného prostředí. Díky IRF by tak mohlo dojít k uvolnění nepříjemně vysokých dávek do biosféry. Např. hlavně díky radionuklidu ^{14}C . Ve stabilních horninových masivech, se považuje jako postačující řešení ocelového ÚOS.

4.1.3 Důležité aspekty

Uvažuje se s ukládáním jak VJP, tak i HLW a implementace v širokém okruhu hostitelských hornin.

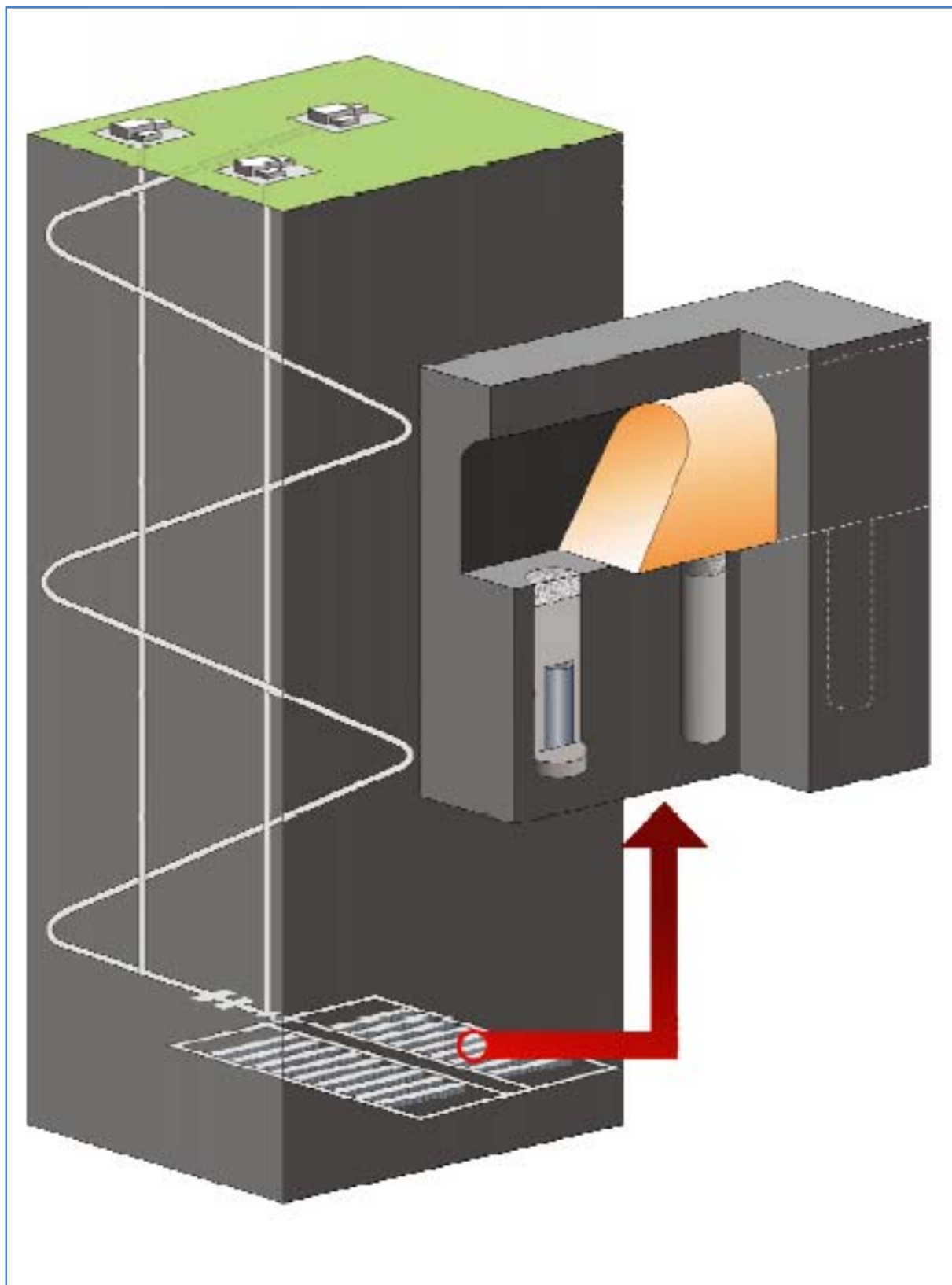
Koncept je zdokonalen pro ukládání v krystalických horninách a je o něm značná databáze znalostí a to hlavně díky 30-ti letému výzkumu, vývoji a experimentálním testům některých světových organizací jako SKB (Švédsko) a Posiva (Finsko).

Díky použití korozně odolným materiálů, poskytuje dlouhodobou kontrolu nad rozpadem radioaktivních prvků. Pokud bude přírodní bariéra schopná dlouhodobě izolovat a chránit ÚOS, redukuje se tak důraz na hostitelskou horninu a vlastnosti geosféry.

Zvětšení ukládací chodby proto, že ÚOS se ukládá ve vertikální poloze (problém vzniká zvláště u dlouhých palivových elementů PWR reaktorů). Tím pádem i velký poměr vyrubané horniny připadající na jeden ÚOS.

Ve vlhkých geologických masívech je nutný dodatečný experimentální výzkum, jelikož je obtížné určit optimální umístění bentonitové výplně, vzhledem k její hustotě a geometrickým tolerancím.

Přijatelné podmínky pro ukládací vrty jsou rozhodující pro bezpečnost dlouhodobého ukládání, avšak operační kritéria ještě nebyla pevně stanovena, a musí být přesně specifikována.



Obr. 5-1: Pohled na Koncept 1 s detailním zobrazením podzemní části [11]

V detailu obr. 4.1 podzemní části je zobrazena ukládací chodba s výplňovou vrstvou a ÚOS uložený ve vertikálním vrtu, který zatěsněný vrstvou bentonitu.

4.2 Koncept 2

4.2.1 Charakteristika

Jeden nebo více ÚOS jsou umístěny v krátkých, horizontálních vrtech o průměru 0,7 – 1,5 m, vyvrtaných do stěn, většinou do obou stěn ukládacího tunelu. Tak jako v předchozím konceptu se uvažuje ukládání v měděných ÚOS s ocelovým nebo litinovým vnitřním pouzdrem. Pro ochranu a izolaci ÚOS je uvažováno použití bentonitu.

4.2.2 Hlavní prvky konceptu

Původní koncept byl vyvinut organizací SKC-CEN (Belgie) a Andra (Francie) pro ukládání vitrifikovaného HLW v masivu hostitelské horniny. Podobný koncept byl vyvinut v Nizozemí pro ukládání v solných formacích. Ze začátku byl koncept uvažován pro ukládání malého počtu ÚOS v tunelech, které nepřesáhnou délku několika desítek metrů. Zejména ve slabších horninových masívech.

Při použití dlouhých vrtů může docházet s velkou pravděpodobností ke změně jejich průměrů. Což by v konečném důsledku mohlo mít za následek přerušení všech operací spojeným s umístěním ÚOS do vrtu. V mezním případě by mohlo dojít k tomu, že ÚOS by měl jen o něco málo menší průměr jak ukládací vrt.

Dle Andra se při použití horizontálního způsobu ukládání viz ob. 4.2 zlepši podstatně stabilita ukládacího vrtu, oproti ukládání vertikálním. Například v jílových horninových masívech. Taktéž navrhuje vyložení průměru vrtu ocelovou kruhovou vložkou, bez použití jakékoliv výplně.

4.2.3 Důležité aspekty

Organizace Andra se snaží tento koncept uzpůsobit pro použití v jílových horninách, jež poskytují dobrou a dlouhodobou ochranu přírodní bariéru i bez použití přídavného zásypu v ukládací chodbě.

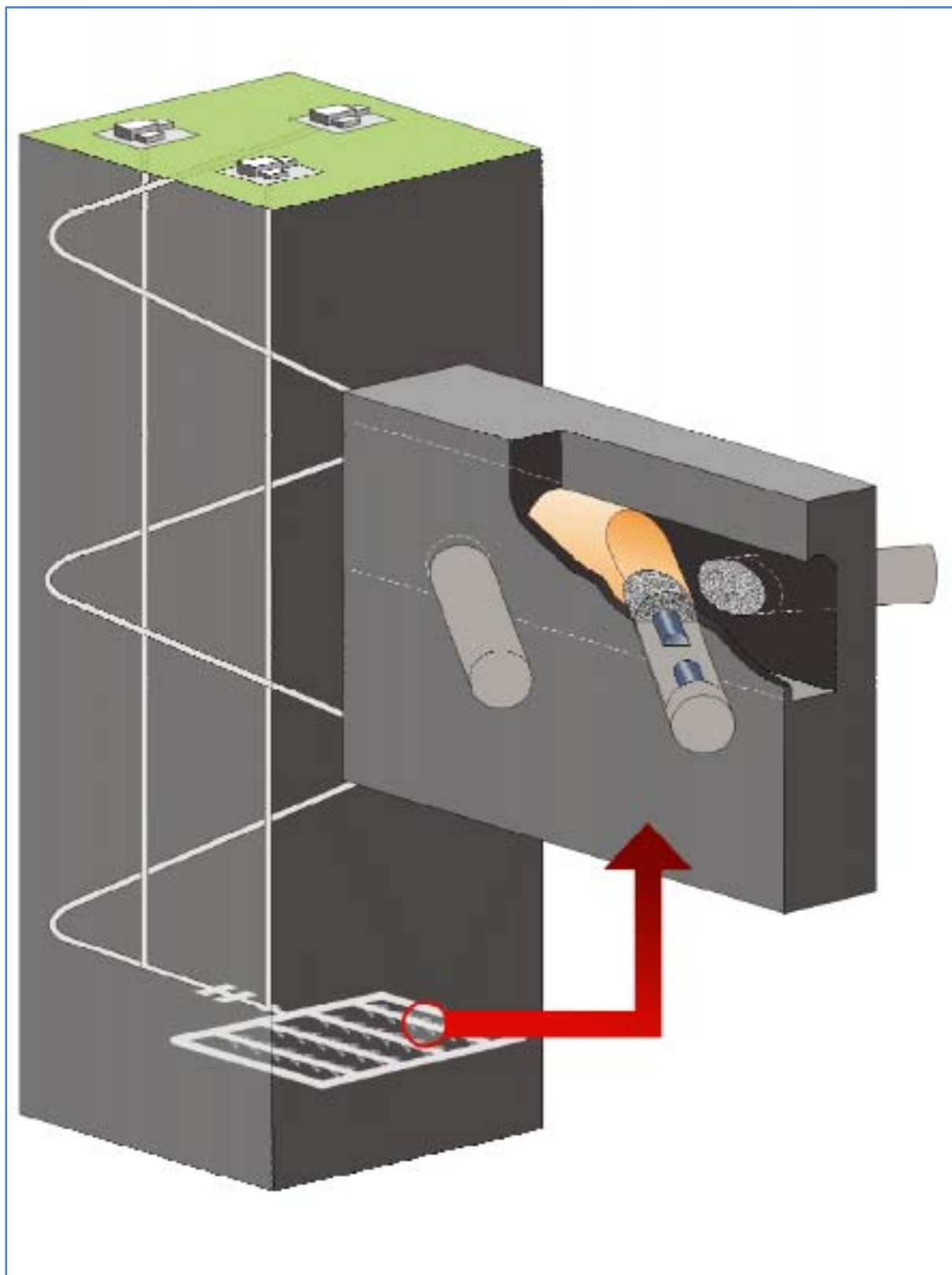
Koncept je relativně jednoduchý, praktický a účinný. Vyznačuje se malým poměrem vyrubaného objemu horniny, který připadá na jeden ÚOS.

Je flexibilní takže může umožnit ukládání VJP i HLW, ačkoli jsou zde nezodpovězené otázky, týkající se působení tepelného výkonu ÚOS s VJP na hostitelskou horninu.

Může nabízet výhody oproti konceptům s vertikálním umístěním ÚOS. Např. nutnost vyplnit všechny pozice pro ÚOS v ukládací chodbě, těsně před uzavřením chodby HÚ a také vlastností vertikálního umístění.

Koncept není příliš vhodný pro ukládání v krystalových nebo sedimentárních geologických masívech. Zejména chybí provedení experimentálního výzkumu v těchto podmínkách.

Ačkoli je velmi flexibilní s ohledem na různé geologické útvary, je zapotřebí vytvořit experimentální prostředí, např. pro rozrušené masivy kde bude nutné použití tlumící vrstvy.



Obr. 5-2: Pohled na Koncept 2 s detailním zobrazením podzemní části [11]

V detailu obr. 4.2 podzemní části je zobrazena ukládací chodba s výplňovou vrstvou a ÚOS uložený v horizontálním vrtu zatěsněný bentonitem.

4.3 Koncept 3

4.3.1 Charakteristika

Odpad je uložen v ocelovém ÚOS, který poskytuje kompletní kontrolu po několik stovek až tisíc let. ÚOS jsou umístěny v ukládací chodbě osově s ukládací chodbou a jsou obklopeny silnou těsnicí vrstvou bentonitu, která vyplňuje ukládací tunel. Ukládací chodba je uzavřena ihned po vyplnění všech úložných pozic, velmi důkladnou pečetí. Tato pečeť bude odolávat tlaku od napučání bentonitu.

4.3.2 Hlavní prvky konceptu

Koncept byl vyvinut organizací Nagra pro ukládání HLW. Má za sebou dva provedené experimentální výzkumy, jeden ve Švýcarsku (Nagra) pro ukládání v krystalových horninových masívech a druhý v Belgii (Ondraf/Niras) pro ukládání v plastických jílech.

Ve Švýcarsku byl tento test založen na rozsáhlých zkušenostech s ražením ukládací chodby kruhového průřezu, pomocí TBM (Tunel Boring Machine – speciální stroj pro ražbu podzemních tunelů). Předpokládá se totiž, že EDZ bude menší, jestliže bude použito technologie TBM. ÚOS by mohl být dobře izolován podél osy tunel s použitím bentonitové výplně. Tím by bylo možné se vyhnout účinkům EDZ v ukládacím tunelu spíše, než při použití ukládání ÚOS ve vertikálních vrtech.

Osové ukládání v kruhových tunelech je viděno jako účinná metoda ukládání ÚOS, vykopaný objem na ÚOS je minimalizován, z důvodu relativně malého průměru tunelu.

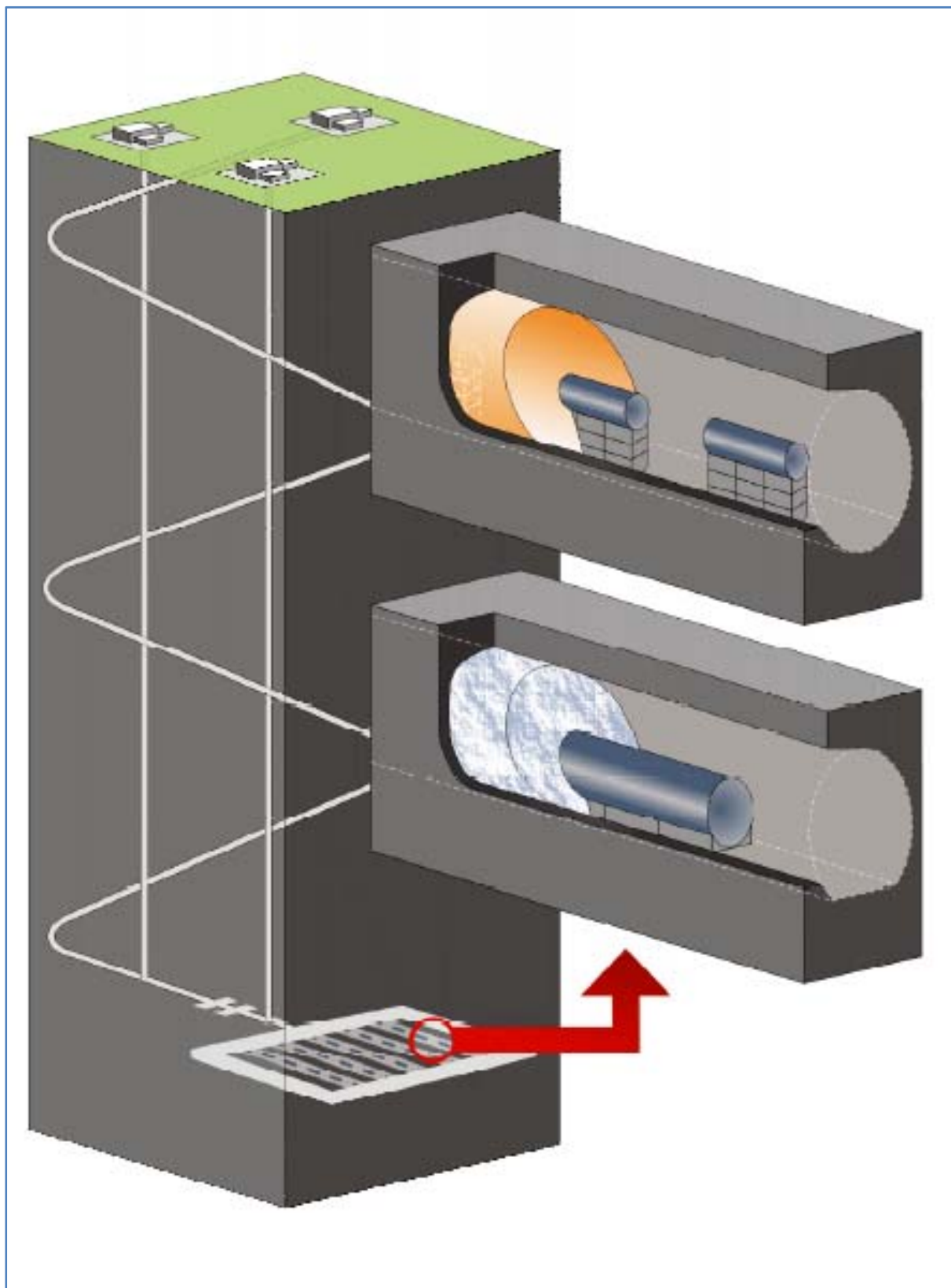
4.3.3 Důležité aspekty

Tento koncept je flexibilní protože může umožnit ukládáním VJP tak HLW (zbytky z přepracování JP) a implementaci v širokém okruhu hostitelských hornin. Nejlepší vlastnosti vykazují převážně v suchých horninových masívech.

Může mít malý poměr objemu vyrubané horniny na jeden ÚOS. Úměrně tomu menší úložiště, protože ukládací tunely jsou použity pro osové axiální umístění ÚOS a není zde potřeba převracet, či otáčet ÚOS nebo s ním jakkoliv manipulovat pro uložení ve vrtných hnízdech. Ani potřeba dostatečného místa v ukládací chodbě pro vyvrtání těchto děr.

Ve vlhkých geologických masívech je nutný dodatečný experimentální výzkum, jelikož je obtížné určit optimální umístění bentonitové výplně, vzhledem k její hustotě a geometrickým tolerancím.

Je vhodný pro implementaci jak v krystalových tak v sedimentárních horninách a má velmi značnou databázi znalostí díky 30-ti letému výzkumu, vývoji a experimentálním testům některých národních programů např. NUMO (Japonsko), Enresa (Španělsko), Ondraf/Niras (Belgie), DBE Tech (Německo) a samozřejmě Nagra (Švýcarsko).



Obr. 5-3: Pohled na Koncept 3 a 4 s detailním zobrazením podzemní části HÚ [11] V horní části detailu je zobrazena ukládací chodba s ÚOS, který je uložen v ose ukládací chodby. Ve spodní části detailu je zobrazeno ukládání se zásypem na bázi solí.

V konceptu 4 se uvažuje použití ÚOS s titanovým nebo měděným vnějším přebalem.

4.4 Koncept 4

4.4.1 Charakteristika

Odpad je uzavřen v měděném nebo titanovém, kožně odolném ÚOS, který může poskytovat jeho dlouhodobou ochranu. ÚOS je umístěn osově podél ukládacího tunelu a je obklopen silnou těsnicí vrstvou bentonitu, jež bez dalšího zásypu kompletně vyplňuje tunel. Ukládací tunely jsou uzavřeny bezprostředně po vyplnění všech volných míst určených k umístění ÚOS, silným těsněním, které bude odolávat tlaku od napuchání bentonitu.

4.4.2 Hlavní prvky konceptu

Tento koncept je v základech podobný předchozímu. Hlavní změna je především v použití měděných nebo titanových ÚOS s železným vnitřním pouzdrům pro mechanickou pevnost, namísto krátkodobých ÚOS s ocelovým vnějším přebalem.

Koncept byl doposud vyvíjen pod OPG (Ontario Power Generation) v Kanadě. Pro ukládání VJP v krystalických horninách Kanadského Štítu. Použití dlouhodobých ÚOS ukázalo jako výhodné oproti ocelovým ÚOS s ohledem na IRF z VJP, jako dlouhodobá ochrana, která přináší významný rozpad některých bezpečnostně významných IRF nuklidů (např. ^{14}C) a stejně tak poruch ÚOS, a tím umožní dlouhou dobu ochrany.

OPG design se od předchozího konceptu liší tím, že má dva ÚOS vedle sebe na jedné ukládací pozici, které se přizpůsobí velmi silnému anizotropnímu napětí, jež bylo nalezeno v některých částech Kanadského Štítu. Tento design vytlačil dřívější Kanadský design AECL, který uvažoval vertikální ukládací hnízda v podlaze ukládací místnosti, protože anizotropní napětí způsobovalo problém se stabilitou ukládacího hnízda.

V OPG designu má těsnicí vrstva několik částí. Používá se bentonit a směs bentonitu a písku s rozdílnými počátečními hustotami. Okolo ÚOS je jako jednotná část umístěn bentonit s vysokou hustotou, obklopující oba ÚOS a na něm je směs bentonitu a písku. Toto zjednodušení a urychlení, zabránilo použití komplexních mnoho tvarových bloků, právě tak jako použití přidavného stínění během umísťovacích operací.

4.4.3 Důležité aspekty

Uvažuje se možnost ukládání jak VJP tak i HLW a užití v širokém rozsahu hostitelských hornin. Koncept vykazuje obzvláště dobré podmínky pro oválný příčný průřez ukládací chodby.

Má menší poměr objemu vyrubané horniny připadajícího na jeden ÚOS než koncept 1 a úměrně tomu menší úložiště. To proto, že ÚOS je umísťován přímo v ukládací chodbě a ve vodorovné poloze a tudíž není zapotřebí s ním manipulovat popřípadě jej otáčet.

Dlouhodobá ochrana díky použití ÚOS s vnějším přebalem vyrobeným z mědi popřípadě titanu.

Obtížné určení umístění kompaktní bentonitové výplně vzhledem k jeho vlastnostem hustoty ve vlhkých horninových masivech.

4.5 Koncept 5

4.5.1 Charakteristika

Odpad je umístěn osově v kruhovém tunelu ve formě super kontejnerů viz obr. 5.6. ÚOS a těsnicí vrstva jsou předmontovány v povrchové části úložiště na děrovanou ocelovou, manipulační nástavbu. Ukládací tunel by měl být vyroben velmi přesně, to proto, aby bylo možno minimalizovat volný prostor okolo super kontejneru, který bude postupně vyplněn napucháním těsnicí vrstvy. Neuvažuje se použití žádná přídavná navážky ani dalšího těsnicího materiálu.

4.5.2 Hlavní prvky konceptu

SKB (Švédsko) a Posiva (Finsko) se rozhodli zhodnotit horizontální verzi konceptu KBS-3, známou jako KBS-3H, vzhledem k potenciálním problémům oddrolování horniny v okolí vertikálních ukládacích vrtů.

Osové umístění ÚOS se zdá výhodné při redukci EDZ v okolí ukládacího tunelu, při použití malého průměru tunelu.

Umístění bentonitové výplně ve formě bentonitových prefabrikátů ve velmi vlhkých podmínkách je nicméně problematické z důvodu předčasného napuchání bentonitu, které způsobuje jeho praskání a rozpad. Toto vedlo k vývoji super kontejnerů, v kterých jsou ÚOS a těsnicí výplň umístěny jako jeden celek uvnitř děrované manipulační nástavby.

Super kontejnery jsou do ukládacích tunelů umísťovány pomocí speciálního zařízení, které vytvoří vodní polštář a posune super kontejner na příslušnou ukládací pozici.

Jakmile dojde k nasycení bentonitu v super kontejneru, začne napuchat a vytlačovat se mimo manipulační nástavbu. Takto je každý super kontejner izolován v ukládacím tunelu pomocí bentonitu jen částečně (distanční bloky). Distanční bloky také slouží k rozmístění ÚOS a zajištění tepelných podmínek bentonitu.

4.5.3 Důležité aspekty

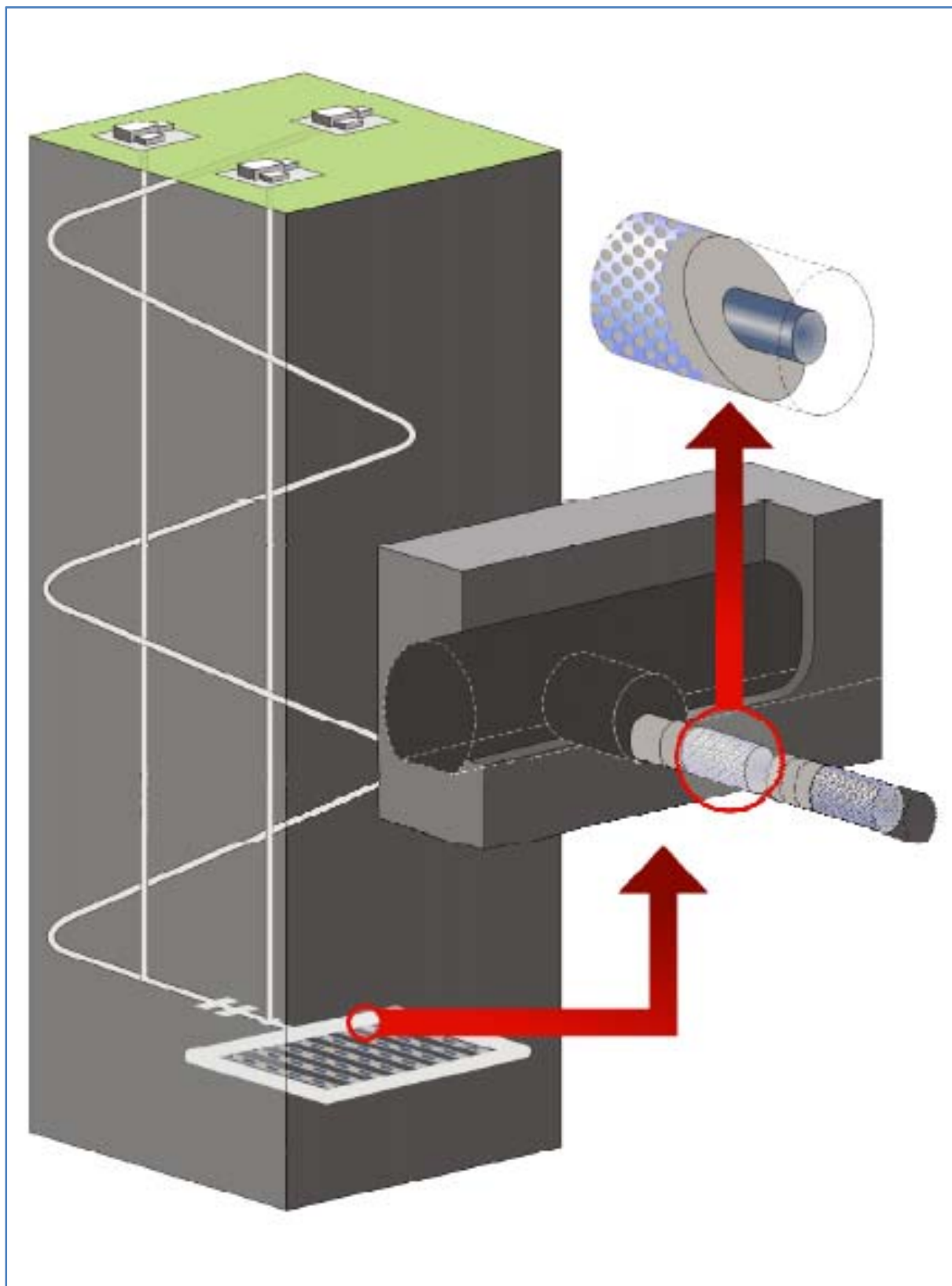
Uvažuje se možnost ukládání jak VJP tak i HLW a užití v širokém rozsahu hostitelských hornin.

Má menší poměr vyrubané horniny na ÚOS a tomu úměrně menší úložiště, protože ÚOS je umísťován přímo v ukládací chodbě a ve vodorovné poloze a tudíž není zapotřebí s ním manipulovat popřípadě jej otáčet.

Příjemné podmínky pro ukládací pozice nejsou dobré při uvažování bentonitové eroze v anuloidu okolo super kontejneru. Je zde požadavek na detailní charakteristiku ukládacích tunelů, které mohou mít vliv na použití konceptu ve vlhkých, rozrušených horninových masivech závislosti na požadované délce tunelu.

Dlouhodobý efekt z interakce mezi bentonitem a korozními produkty manipulační nástavby může způsobit nejistoty ohledně efektivní tloušťky výplně, která může být redukována z tloušťky nominálního umístění. Tato nezbytnost zabrání nepříznivým efektům interakce díky betonové krycí vrstvě tunelu i ve slabých horninových masivech.

Velmi malý anuloid okolo super kontejneru znamená, že obnovení umístění super kontejneru zařízení vytvářející vodní polštář, může být nevhodné, zejména poté co se bentonit vysune skrz děrovanou nástavbu a hlavně ve vlhkých částech tunelu.



Obr. 5-4: Pohled na Koncept 5 s detailním zobrazením podzemní části HÚ [11]

V horní části obrázku je detailní pohled řešení „superkontejneru“.

4.6 Koncept 6

4.6.1 Charakteristika:

Uvažuje se osově umístění odpadu v kruhových ukládacích tunelech, ve formě „superkontejneru“. ÚOS a těsnicí výplňová vrstva jsou předmontovány v povrchové části hlubinného úložiště na mechanickou ocelovou nádstavbu. Výplňový materiál tvoří běžný OPC (Portlandský cement) – základní beton. Průměr ukládacího tunelu může být podstatně větší než „superkontejneru“, který je položen na malém základu na své ukládací poloze. Z důvodu vzniku velkého anuloidního prostoru mezi ÚOS a tunelem se musí použít dodatečný zásyp na cementové bázi. Ukládací tunely mohou být až několik set metrů dlouhé.

4.6.2 Hlavní prvky konceptu

Koncept byl vyvinut organizací Ondaf/Niras (Belgie) pro užití ve tvárných jílech na adresované problémy, které byly zjištěny v dřívějším konceptu SAFIR 2, v kterém ÚOS s HLW klouzaly z ukládací pozice podél kovových trub osově umístěných v bentonitu v ukládacím tunelu.

Design konceptu SAFIR 2 byl ukončen kvůli neustálým problémům s EBS. Byla zvážena možnost, že určité typy koroze, jako lokální nebo korozní praskání, mohou ohrozit integritu vnějšího přebalu ÚOS během tepelných změn.

Zde vznikly otázky s ohledem na praktickou realizaci, obzvláště týkající se rozpínání střední ocelové trubky. Rozpínání spojené s tlakem vyvozeným napucháním jílové těsnicí vrstvy, může vést ve vysoce napjaté oceli, k plastické deformaci. Výpočty ukázaly, že maximální dovolená délka trubky musí být menší než 20 metrů.

Užitím superkontejneru je odpad stíněn během všech umístěvacích operací, které jsou tím zjednodušené, také zde nevznikají žádné škodlivé interakce mezi betonovou výplní, zásypem a betonovou obálkou tunelu. Výplň z OPC betonu je navržena tak aby odolávala alkalizačním a pasivizačním podmínkám okolo ÚOS.

4.6.3 Důležité aspekty

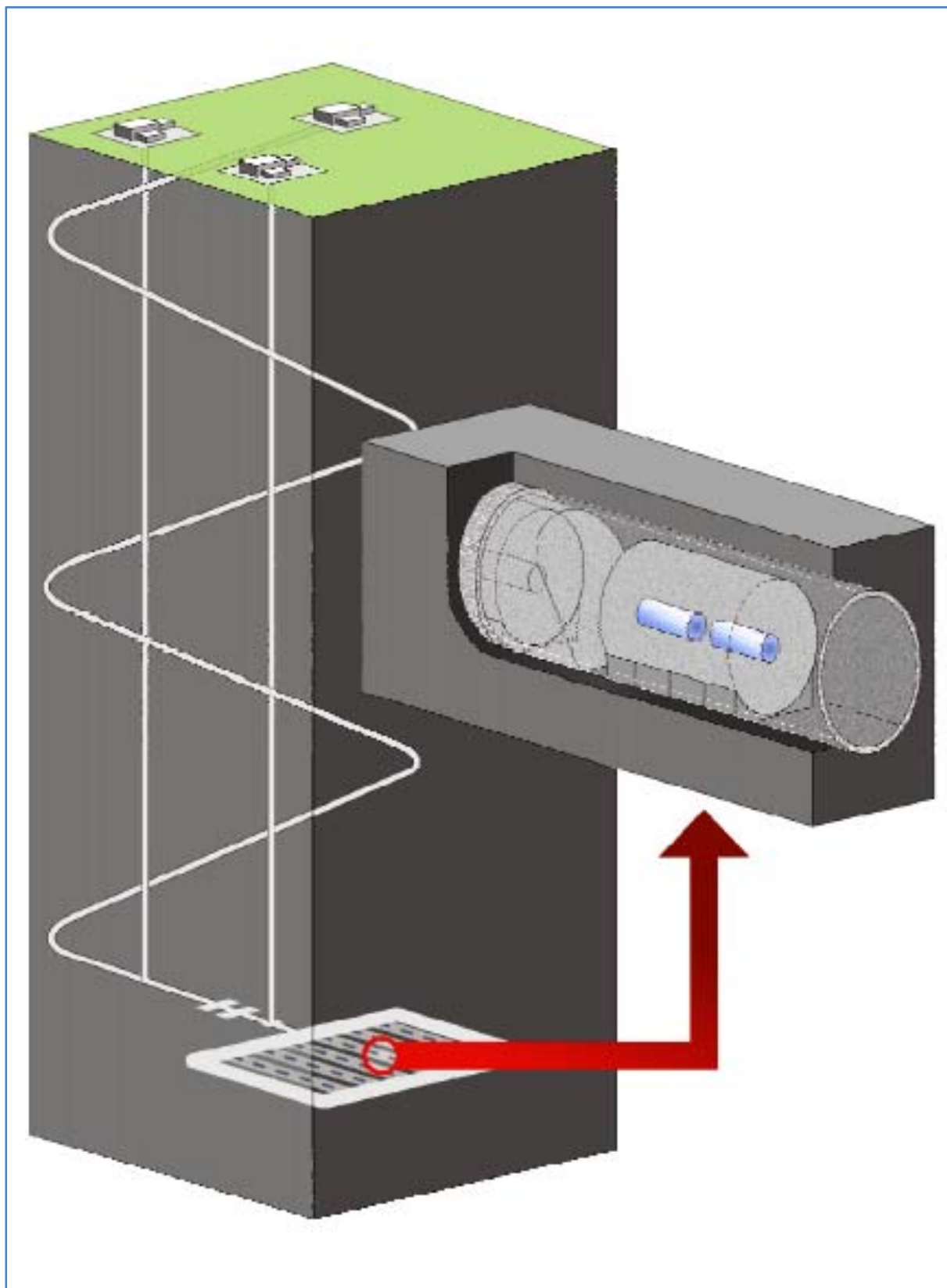
Uvažuje se možnost ukládání jak VJP tak i HLW.

Může mít menší poměr objemu vyrubané horniny připadající na jeden ÚOS a úměrně tomu menší úložiště, protože ÚOS je umístován přímo v ukládací chodbě a ve vodorovné poloze a tudíž není zapotřebí s ním manipulovat popřípadě jej otáčet.

Použití „superkontejneru“ zvyšuje bezpečnost během ukládacích operací, díky zjednodušení operací a robustnosti a také díky použití samostínícího ÚOS.

Koncept je založen přibližně na pětiletém výzkumu a vývoji a je vybudován na značných zkušenostech získaných díky konceptu SAFIR 2 a výzkumech v plastických jílech.

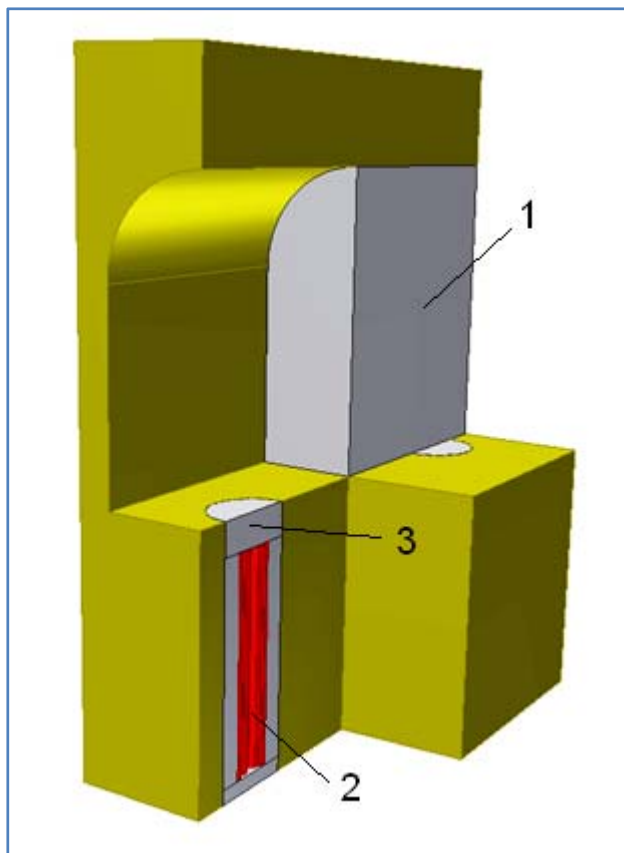
Dlouhodobé vlastnosti betonové OPC výplně v podmínkách difúzně – transportních bariér jsou nejisté, zejména v prostředí kde může docházet k praskání hostitelské horniny. Je nejvíce vhodný pro hostitelské horniny, v nichž interakce mezi vysoce alkalickými kapalinami z betonu a hostitelské horniny budou omezeny blízkostí vnějšího pole a nebudou významně ovlivňovat geosféru.



Obr. 5-5: Pohled na Koncept 6 s detailním zobrazením podzemní části HÚ [11]

Dvě odlišné formy výplně ukládací chodby, je možné vidět v detailu na obr. 5-5.

5 Řešená soustava

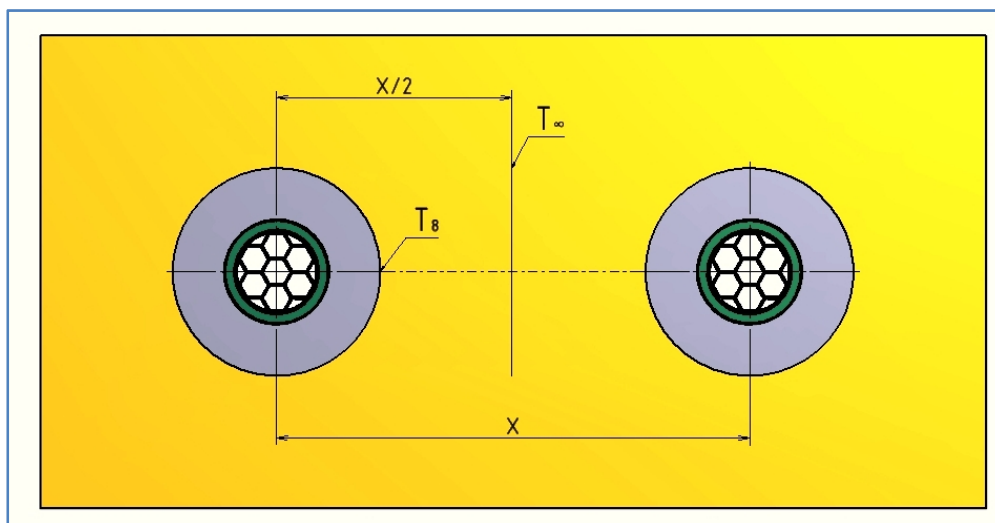


Obr. 5-1: Řešená soustava
1 – Výplň ukládací chodby, 2 – ÚOS, 3 – Bentonitová výplň

Pro řešení přestupu tepla v ÚOS a jeho vliv na těsnící, výplňové vrstvy a dále pak na geosféru, bude provedeno na konceptu hlubinného úložiště navrženého pro Českou republiku. ÚOS použitý v této variantě uložení je koncepčního řešení Škoda JS a je to ÚOS pro 7 palivových kazet typu VVER 440. Toto řešení je velmi příbuzné ke konceptu 1, který je uveden v kap. 4.1. ÚOS, který je v této variantě použit, je však rozdílný. Schematické zobrazení ukládací chodby se dvěma ÚOS je zobrazeno na následujícím obrázku 5-1. Na obrázku 5-2 je znázorněna situace mezi dvěma ÚOS. Veličina X je osová vzdálenost dvou ÚOS mezi sebou. Určení tohoto parametru je jedním z hlavních úkolů této diplomové práce. Jednak určení změny parametru X v závislosti na poklesu výkonu ÚOS, tak návrhu konstrukčních materiálů, z kterých může být ÚOS zkonstruován a v neposlední řadě použití rozdílného

způsobu utěsnění ÚOS ve vertikálním vrtu.

Rozdílným způsobem utěsnění je myšleno použití buď bentonitu ve formě prefabrikátů, nebo foukaného práškového bentonitu. Teplota T_{∞} je návrhová teplota, ke které bude vztahován návrh parametru X při změně tepelného výkonu ÚOS. V žádném případě se tato teplota nikdy nebude rovnat teplotě, která by v tomto místě byla dána střední hodnotou teploty zemského povrchu s uvážením geotermického gradientu $0,03 \text{ [K/m]}$. Ta by zde byla pouze v případě, že by byly ÚOS od sebe vzdáleny velmi daleko.

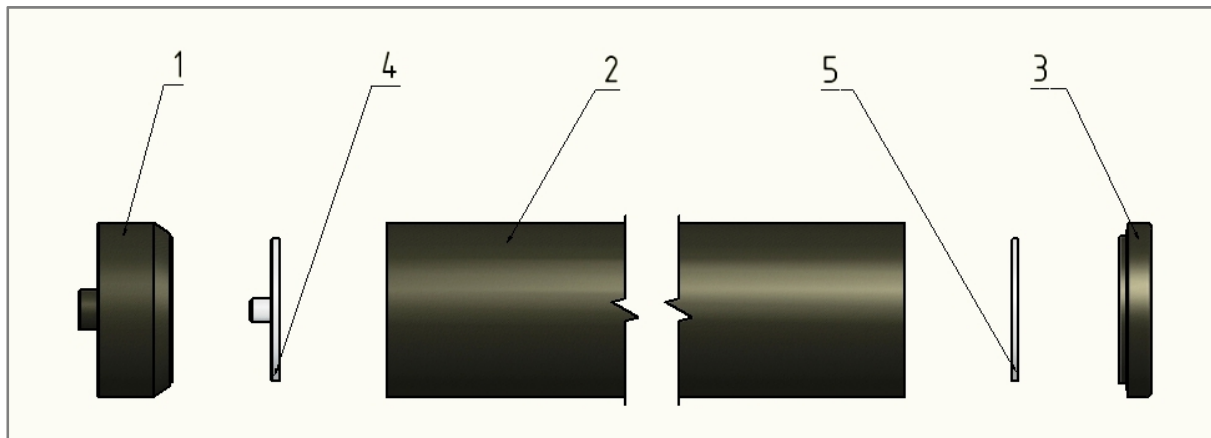


Obr. 5-2: Zobrazení hlavních určujících veličin

6 Přestup tepla v ÚOS a jeho vliv na okolí

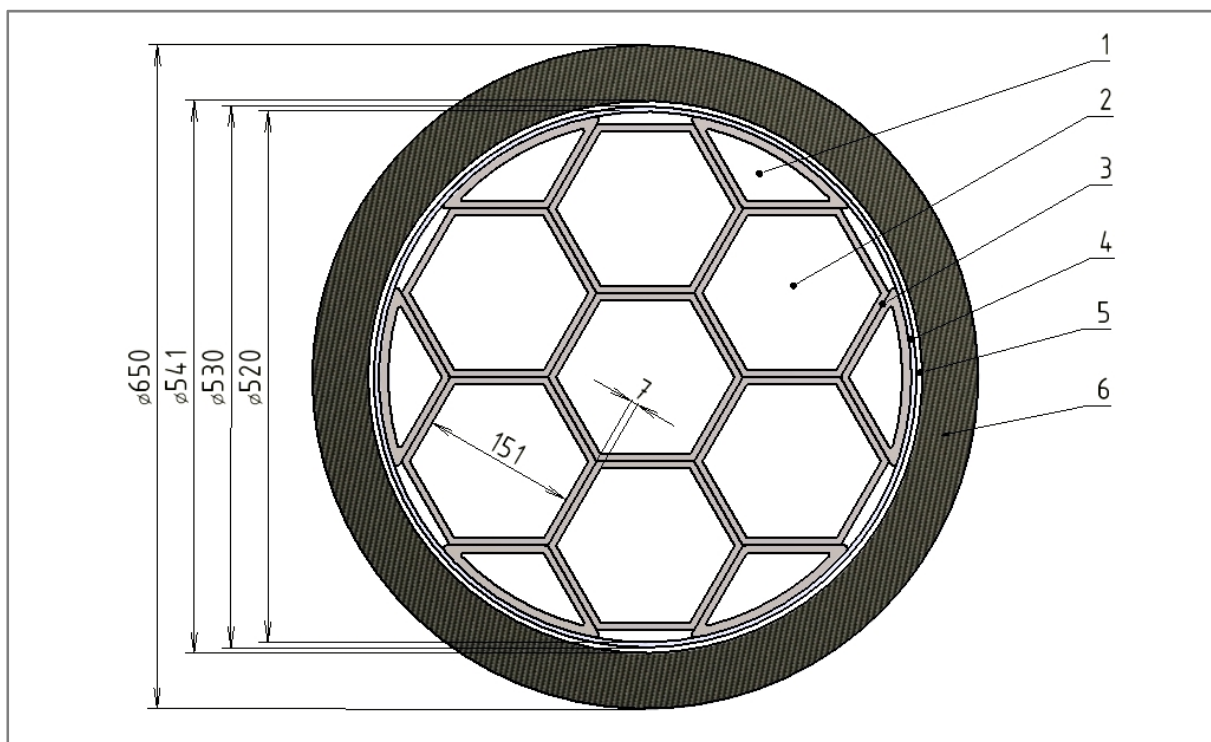
6.1 Zvolená alternativa ÚOS pro výpočet

Pro výpočet přestupu tepla byla zvolena varianta ÚOS pro 7 palivových kazet typu VVER 440 řešení dle Škoda JS. Schéma provedení je uvedeno na obr. 6-1. Řez ÚOS včetně popisu komponent je zobrazen na obr. 6-2.



Obr. 6-1: ÚOS pro PK VVER 440 [2]

1 – víko vnějšího přebalu, 2 – plášť vnějšího přebalu, 3 – dno vnějšího přebalu, 4 – víko vnitřního pouzdra, 5 – dno vnitřního pouzdra



Obr. 6-2: Příčný řez ÚOS [2]

1 – prostor pro naplnění Heliem, 2 – palivová kazeta typu VVER 440, 3 – vestavba vnitřního pouzdra, 4 – plášť vnitřního pouzdra, 5 – prostor pro naplnění Dusíkem, 6 – plášť vnějšího přebalu

6.1.1 Popis hlavních částí ÚOS

Uvedené informace jsou převzaty z [2].

Vnější přebal:

- tvoří trubka $\varnothing 650 \times 54,5$ mm do které je zasazeno vnitřní pouzdro
- je vyroben z uhlíkové oceli - No. 1.6338 (WB 36)

Vnitřní pouzdro:

- plášť pouzdra je zkroužen z plechu tloušťky 5 mm
- je z nerezové oceli – ČSN 17.248
- vestavba pouzdra je ze 7 profilovaných trubek
- je z materiálu AlMgSi 0,5

6.2 Základy teoretického výpočtu

6.2.1 Fourierův zákon

Převzato z [14].

„ Měrný tepelný tok (to je tepelný tok \dot{Q} vztažený na jednotku plochy S) \dot{q} [W/m^2] přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient. “ [14].

$$\vec{q} = \frac{\vec{Q}}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \quad (1)$$

Ve skalární formě:

$$\dot{q} = \lambda \frac{\Delta T}{\delta} \quad \text{nebo} \quad \dot{Q} = \lambda \cdot S \frac{\Delta T}{\delta} \quad (2)$$

kde: δ – tloušťka tělesa ve směru tepelného toku [m]
 λ – tepelná vodivost [W/mK]

Fourierův zákon pro 3D těleso můžeme napsat ve tvaru:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} \cdot T = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (3)$$

6.2.2 Zjednodušená diferenciální rovnice energie

Převzato z [12].

Pro výpočet přestupu tepla v 3D tělese, se musí ze všeho nejdříve provést odvození zjednodušené diferenciální rovnice energie. Odvození se provede na 3D tělese dle [12] pro nestacionární případ (teplotní pole v tělese se mění v závislosti na čase). Mějme krychli, jak je uvedeno na obr 6-3. Zapiše se bilance tepelných toků, které do tohoto objemového elementu vstupují stěnami, jejichž plocha je S a které mají souřadnice x , y , z . Tepelné toky vystupují

z objemového elementu stěnami, jejichž souřadnice jsou $x + dx$, $y + dy$, $z + dz$. Dále se předpokládá, že v objemu daného objemového elementu je zdroj tepelné energie.

Energetickou bilanci pro objemový zdroj lze zapsat takto:

$$\begin{bmatrix} \text{tepelný tok} \\ \text{vstupující do} \\ \text{elementu} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{tepelná energie} \\ \text{generovaná v} \\ \text{elementu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{změna vnitřní} \\ \text{energie} \\ \text{elementu} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{tepelný tok} \\ \text{vystupující z} \\ \text{elementu} \end{bmatrix}$$

Nyní k jednotlivým veličinám:

- Tepelný tok vstupující do elementu levou stěnou ve směru x :

$$\dot{Q}_x = -\lambda \cdot S \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x = \dot{q}_x \cdot S = \dot{q}_x \cdot dx \cdot dy \quad [W] \quad (4)$$

- Tepelná energie generovaná v objemu v elementu (vnitřní zdroj):

$$\dot{Q}'_{zdroj} = \dot{Q}_{zdroj} \cdot dV = \dot{Q}_{zdroj} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad [W] \quad (5)$$

- Změna vnitřní energie objemového elementu v čase:

$$\frac{dU}{dt} = m \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \rho \cdot c \cdot dx \cdot dy \cdot dz \frac{\partial T}{\partial t} \quad [W] \quad (6)$$

- Tepelný tok vystupující z objemového elementu pravou stěnou ve směru x :

$$\dot{Q}_{x+dx} = -\lambda \cdot S \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} = \dot{q}_{x+dx} \cdot S = \dot{q}_{x+dx} \cdot dx \cdot dy \quad [W] \quad (7)$$

Zcela analogicky se definují tepelné toky vstupující a vystupující z objemového elementu ve směru y a tepelné toky vstupující a vystupující z objemového elementu ve směru z . Rovnice energetické bilance pro objemový element se přepíše do tvaru:

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z + \dot{Q}'_{zdroj} = \frac{dU}{dt} + \dot{Q}_{x+dx} + \dot{Q}_{y+dy} + \dot{Q}_{z+dz} \quad (8)$$

Nyní se dosadí do rovnice vztah pro měrný tepelný tok pro 3D obecné těleso. Fourierův zákon pro 3D těleso je možné napsat ve tvaru:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} \cdot T = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (9)$$

Nebo po rozepsání do jednotlivých tří směrů (\vec{q} je vektor):

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

Vztahy (X) se dosadí do rovnice (X) a po jednoduché úpravě:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{zdroj} = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

Což je rovnice **energie** nebo také rovnice **tepelné difúze**.

Pokud se vezme v úvahu, že součinitel tepelné vodivosti je konstantní $\lambda = \text{konst.}$, pak se rovnice zjednoduší na tvar:

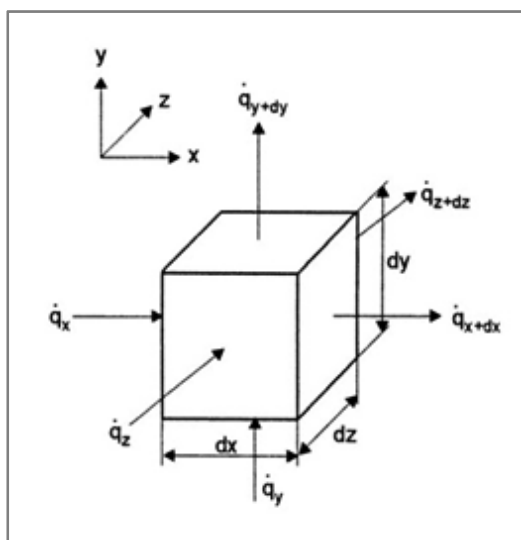
$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

Veličina $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ se nazývá teplotní vodivost.

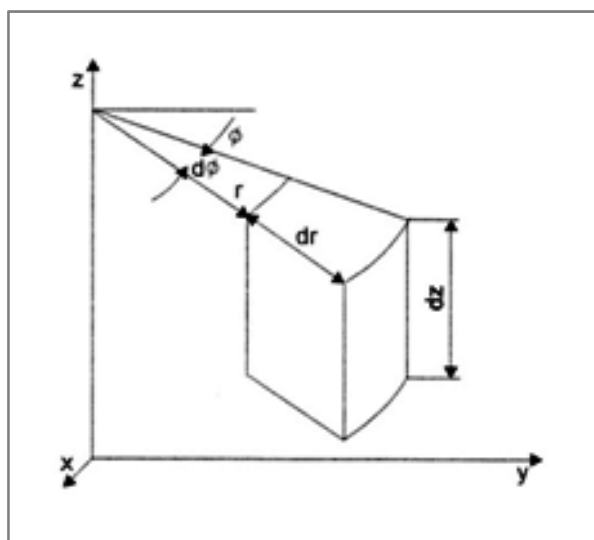
Nyní se transformuje rovnice (12) do cylindrických souřadnic. Rovnice (13) je rovnice energie s vnitřním zdrojem v cylindrických souřadnicích.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

Rovnice (13) je vyjádření rovnice energie s vnitřním zdrojem v cylindrických souřadnicích. Zobrazení cylindrického souřadného systému s objemovým elementem je na obr. 6-3.



Obr. 6-3: Tepelné toky vstupující do objemového elementu [12]



Obr. 6-4: Cylindrický souřadný systém s objemovým elementem [1]

6.3 Zjednodušený model výpočtu ÚOS VVER 440

Z důvodu zjednodušení výpočtu se musí ÚOS geometricky zjednodušit a dále se musí zavést zjednodušující předpoklady problému řešení.

6.3.1 Geometrické zjednodušení

Jde zejména o zjednodušení objemového zdroje tepla. Zdroj 7 PK se nahradí jediným a to válcovým objemovým zdrojem. Předpoklad je, že výkon zdroje 7 palivových kazet profilu šestiúhelníku (reálný zdroj) se rovná, výkonu válcového zdroje s ekvivalentním průměrem.

Vyjde se z následující rovnice:

$$\dot{Q}_{zdroj}^{7PK} = \dot{Q}_{zdroj}^{VÁLEC} \quad (14)$$

$$S_{7PK} \cdot L \cdot \dot{q} = S_{kruh} \cdot L \cdot \dot{q} \quad (15)$$

Uvažuje se stejná délka reálného i ekvivalentního zdroje tepla. Hodnota měrného tepelného toku musí být v obou případech shodná. Pak přejde rovnice (15) do tvaru:

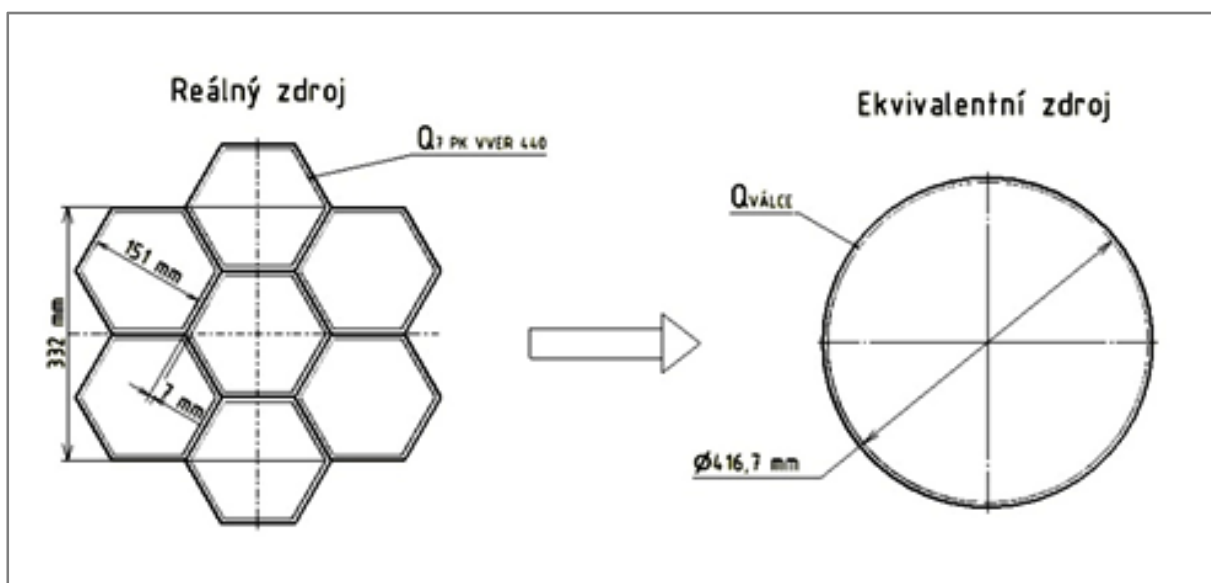
$$S_{7PK} = S_{KRUH} \quad (16)$$

$$7 \cdot 6 \cdot v \frac{c}{2} = \frac{\pi \cdot d_{ekviv}^2}{4} \quad (17)$$

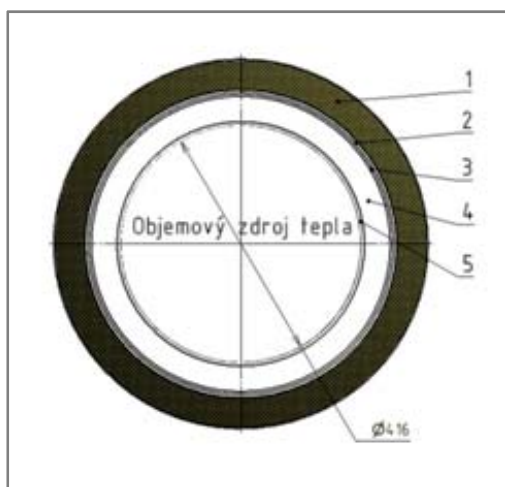
kde v a c jsou výška a přepona trojúhelníku. A průměr ekvivalentního válcového zdroje bude:

$$d_{ekviv} = \sqrt{\frac{84 \cdot v \cdot c}{\pi}} = \sqrt{\frac{84 \cdot 75,5 \cdot 86,6}{\pi}} = 416,7 [mm]$$

Ostatní části ÚOS zůstanou geometricky shodné. Na obr. 6-4 je zobrazena úvaha pro zjednodušení. Na obr. 6-3 je zobrazena varianta vybraného ÚOS pro zjednodušené řešení.



Obr. 6-5: K výpočtu zjednodušeného objemového zdroje tepla



Obr. 6-6: Příčný řez zjednodušeným ÚOS

1 – plášť vnějšího přebalu, 2 – prostor pro naplnění Dusíkem,
3 – plášť vnitřního pouzdra, 4 – prostor pro naplnění Helia,
5 – vestavba vnitřního pouzdra

6.3.2 Zjednodušující předpoklady

Zjednodušující předpoklady pro analytické řešení teplotního pole v ÚOS.

1. Mějme nekonečně dlouhý ÚOS s poloměrem R , tepelný tok je veden pouze ve směru poloměru.

$$\dot{q} = f(R)$$

2. Gradient teploty v závislosti na výšce válce z a úhlu natočení ϕ bude nulový.

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

3. Dle [2] je známo, že tepelný výkon PK a tím i ÚOS bude s časem klesat. K dispozici je přibližný průběh tepelného výkonu v určitých časových obdobích od vytažení PK z JR. Pokud se vezme v úvahu vždy jen tato hodnota, je možné úlohu řešit stacionárně.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

4. Součinitelé tepelné vodivosti λ všech použitých materiálů se nebudou měnit s teplotou. Materiál bude izotropní tj., že vlastnosti materiálu jsou ve všech směrech stejné.

Při uvážení zjednodušujících předpokladů 1 až 4 přejde rovnice (13) na tvar:

s vnitřním objemovým zdrojem tepla:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} = 0 \quad (18)$$

bez vnitřního objemového zdroje tepla:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (19)$$

6.4 Analytický výpočet přestupu tepla

Nejdříve se vyjádří teplotní profily ve válcové stěně a ve válci s vnitřním objemovým zdrojem tepla, aby vznikla představa, jak bude vypadat průběh teploty v závislosti na poloměru ÚOS.

6.4.1 1D teplotní profil válci s vnitřním zdrojem

Převzato z [12].

Vyjde se z rovnice (18). Ta se upraví na vhodnější tvar:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} = 0 \quad (20)$$

Tato rovnice se bude řešit pro okrajové podmínky:

$$\text{OP1: pro } r = r_2 \Rightarrow T = T_2 \quad \text{OP2: pro } r = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dr} = 0$$

Provede se separace proměnných a bude se jednou integrovat:

$$r \frac{dT}{dr} = -\frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} \frac{r_2}{2} + C_1 \quad (21)$$

Rovnice se upraví a provede se další integrace:

$$dT = \left(-\frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} \frac{r}{2} + C_1 \frac{1}{r} \right) dr \quad (22)$$

Po druhé integraci vznikne obecné řešení:

$$T(r) = -\frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} \frac{r^2}{2} + C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (23)$$

Nyní se dosadí okrajové podmínky do obecného řešení (23) a meziřešení (21):

z OP2 plyne, že $C_1 = 0$

z OP1 plyne, že $C_2 = T_2 + \frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} \frac{r^2}{4}$

$$T(r) = -\frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} \frac{r^2}{4} + T_2 + \frac{\dot{Q}_{zdroj}}{\lambda} \frac{r^2}{4} \quad (24)$$

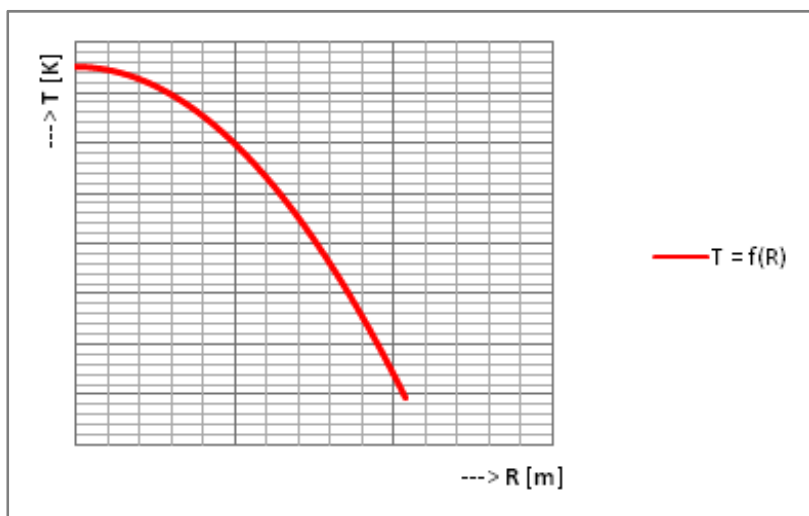
po úpravě vznikne výsledný vztah pro teplotní profil ve válci:

$$T(r) = T_2 + \frac{\dot{Q}_{zdroj}}{4 \cdot \lambda} \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} \right) \quad (25)$$

Pro maximální teplotu v ose platí:

$$T_{\max} = T_2 + \frac{\dot{Q}_{zdroj} \cdot r^2}{4 \cdot \lambda} \quad (26)$$

Z předchozího vztahu je zřejmé, že teplotní profil bude mít parabolický průběh. Viz graf 6-1.



Graf 6-1: Teplotní průběh ve válci s vnitřním objemovým zdrojem tepla

6.4.2 1D teplotní profil ve válcové stěně bez vnitřního zdroje

Převzato z [12].

Vyjde se z rovnice (19), která se upraví na vhodnější tvar:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (27)$$

Definují se okrajové podmínky:

$$\text{OP1: pro } r = r_0 \Rightarrow T = T_i$$

$$\text{OP2: pro } r = r_0 \Rightarrow T = T_0$$

a bude se jednou integrovat:

$$dT = \frac{C_1}{r} dr \quad (28)$$

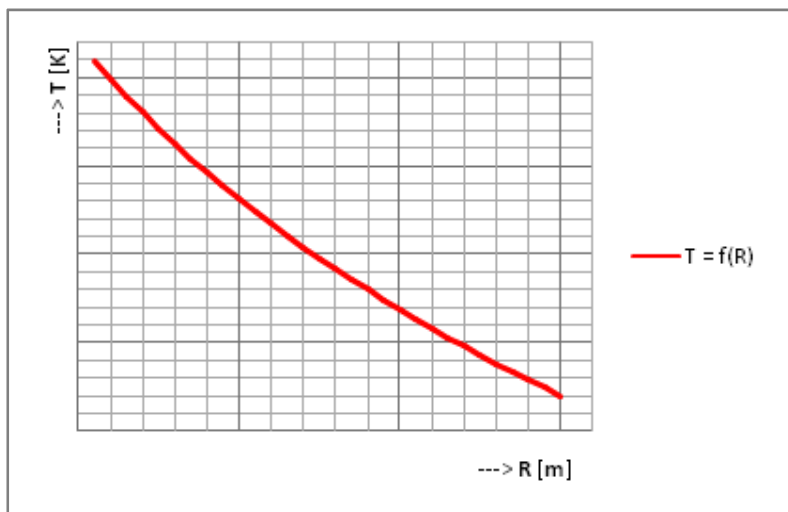
a po druhé integraci se dostane obecný vztah:

$$T = C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (29)$$

Po dosazení OP1 a OP2 do obecného řešení a meziřešení, vznikne vztah pro výpočet teplotního profilu ve válcové stěně:

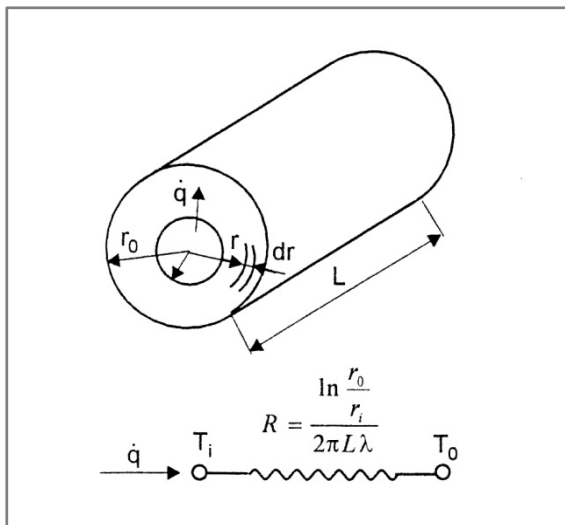
$$T(r) = T_i - (T_i - T_0) \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{r_0}{r_i}} \quad (30)$$

Ze vztahu (30) je zřejmé, že teplotní průběh bude mít tvar logaritmické křivky. Viz graf 6-2.



Graf 6-2: Teplotní průběh ve válcové stěně bez objemového zdroje tepla

6.4.3 Výpočet teplot v hraničních bodech



Obr. 6-7: Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou [12]

V další části výpočtu bude provedeno vyjádření konkrétních hodnot všech teplot v hraničních bodech, viz obr. 6-7.

Rovnice (2) se přepíše do tvaru pro vedení tepla válcovou stěnou a s uvažováním zjednodušujících podmínek v kapitole 6.3.2. Dle [12] pak bude mít Fourierův zákon tvar:

$$\dot{Q} = -2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \frac{dT}{dr} \quad (31)$$

Provede se separace proměnných a rovnice bude řešena v mezích od vnitřního poloměru r_i po vnější r_o v rozsahu teplot od T_i až T_o :

$$\dot{Q} = \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \int_{T_i}^{T_o} dT \quad (32)$$

A výsledný vztah pro tepelný tok ve válcové stěně:

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \cdot (T_i - T_o)}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \quad [W] \quad (33)$$

Dle [12] je možno pomocí analogie s Ohmovým zákon zapsat rovnici (2-25) ve tvaru:

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_o}{R} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln \frac{r_o}{r_i}} \quad [W] \quad (34)$$

kde R je odpor proti vedení tepla.

Z rovnice (2-26) se vyjádří vztah pro výpočet teploty na povrchu válcové stěny:

$$T_i = T_o + \dot{Q} \cdot R_i \quad [^{\circ}C] \quad (34)$$

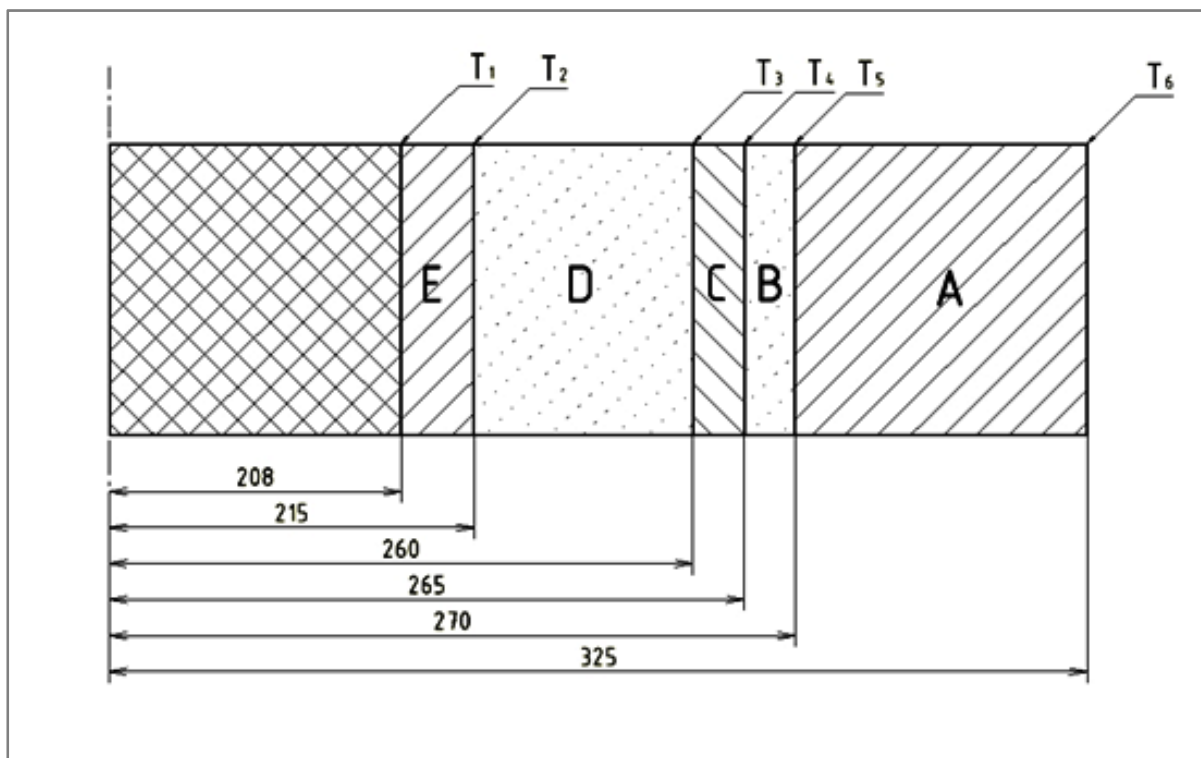
kde R_i je odpor proti vedení tepla příslušné válcové stěny.

$$R_i = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_i} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (35)$$

A teplota na povrchu válcové stěny:

$$T_i = T_o + \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_i} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad [^{\circ}C] \quad (36)$$

Zobrazení všech hraničních teplot je na obr. 6-8, kde teplota T_6 je teplota na povrchu ÚOS. Ve [2] je dáno, že maximální teplota na povrchu ÚOS musí splňovat podmínku $T_6 \leq 100^\circ\text{C}$. Tzn., že teploty budou vyjadřovány postupně od povrchu ÚOS až po teplotu na povrchu válcového zdroje. V tab. 6-1 je přehled parametrů vstupujících do výpočtu.



Obr. 6-8: Zobrazení hraničních teplot v ÚOS (částečný osový řez)

Tab. 6-1: Parametry pro výpočet hraničních teplot [2]

ÚOS pro PK z VVER 440	Stěna A	Stěna B	Stěna C	Stěna D	Stěna E
vnitřní poloměr - r_i [m]	0,27	0,265	0,260	0,215	0,208
vnější poloměr - r_o [m]	0,325	0,27	0,265	0,26	0,215
střední poloměr - R [m]	0,2975	0,2675	0,2625	0,2375	0,2115
tepelná vodivost - λ_i [W/mK] (při 100°C)	49,9	0,033	18,85	0,17	210
tepelný tok - \dot{Q} [W] (65 let od vytažení VJP z JR)	525	525	525	525	525
uvažovaná délka ÚOS - L [m]	3,265	3,265	3,265	3,265	3,265

Pozn.: Uvažovaná délka ÚOS je 3,265 m. Je menší než skutečná délka ÚOS. Tato velikost byla zvolena na základě toho, že přibližná délka PK VVER 440 je právě taková. A tudíž se na této délce předpokládá největší vývin tepla.

Válcová stěna A

- výpočet teploty T_5

Do rovnice (36) dosadíme hodnoty z tab. 6-1:

$$T_5 = 100[^\circ\text{C}] + \frac{525[\text{W}]}{2 \cdot \pi \cdot 3,265[\text{m}] \cdot 49,9[\text{W/mK}]} \ln \frac{0,325}{0,27} = 100,1[^\circ\text{C}]$$

Analogicky dopočítáme teploty T_4 až T_1 .

Válcová stěna B

- výpočet teploty T_4

$$T_4 = 100,1[^\circ\text{C}] + \frac{525[\text{W}]}{2 \cdot \pi \cdot 3,265[\text{m}] \cdot 0,033[\text{W/mK}]} \ln \frac{0,27}{0,265} = 114,6[^\circ\text{C}]$$

Válcová stěna C

- výpočet teploty T_3

$$T_3 = 114,6[^\circ\text{C}] + \frac{525[\text{W}]}{2 \cdot \pi \cdot 3,265[\text{m}] \cdot 18,85[\text{W/mK}]} \ln \frac{0,265}{0,26} = 114,63[^\circ\text{C}]$$

Válcová stěna D

- výpočet teploty T_2

$$T_2 = 114,63[^\circ\text{C}] + \frac{525[\text{W}]}{2 \cdot \pi \cdot 3,265[\text{m}] \cdot 0,17[\text{W/mK}]} \ln \frac{0,26}{0,215} = 143,3[^\circ\text{C}]$$

Válcová stěna E

- výpočet teploty T_1

$$T_1 = 143,3[^\circ\text{C}] + \frac{525[\text{W}]}{2 \cdot \pi \cdot 3,265[\text{m}] \cdot 210[\text{W/mK}]} \ln \frac{0,325}{0,27} = 143,5[^\circ\text{C}]$$

Z předchozího výpočtu je zřejmé, že zvolené teplotě na povrchu ÚOS $T_6 = 100^\circ\text{C}$ odpovídá teplota na povrchu objemového zdroje tepla $T_1 = 143,5^\circ\text{C}$. Tato závislost v podstatě odpovídá meznímu stavu.

Všechny vypočtené teploty v hraničních bodech jsou zobrazeny v tab. 6-2.

Tab. 6-2: Hodnoty teplot v hraničních bodech

$T_1 [^\circ\text{C}]$	$T_2 [^\circ\text{C}]$	$T_3 [^\circ\text{C}]$	$T_4 [^\circ\text{C}]$	$T_5 [^\circ\text{C}]$	$T_6 [^\circ\text{C}]$
143,5	143,3	114,63	114,6	100,1	100

6.4.4 Výpočet středních teplot

V další části výpočtu si vyjádříme střední teploty v jednotlivých válcových stěnách. Do rovnice (30) dosadíme příslušné hodnoty dle tabulek 6-1 a 6-2:

Válcová stěna A

- výpočet střední teploty $T_{stř56}$

$$T_{střA} = 100,1[^\circ\text{C}] - (100,1[^\circ\text{C}] - 100[^\circ\text{C}]) \frac{\ln \frac{0,2975}{0,27}}{\ln \frac{0,325}{0,27}} = 100,048[^\circ\text{C}]$$

Válcová stěna B

- výpočet střední teploty $T_{stř45}$

$$T_{střB} = 114,6[^\circ\text{C}] - (114,6[^\circ\text{C}] - 100,1[^\circ\text{C}]) \frac{\ln \frac{0,2675}{0,265}}{\ln \frac{0,27}{0,265}} = 107,4[^\circ\text{C}]$$

Válcová stěna C

- výpočet střední teploty $T_{stř34}$

$$T_{střC} = 114,63[^\circ\text{C}] - (114,63[^\circ\text{C}] - 114,6[^\circ\text{C}]) \frac{\ln \frac{0,2625}{0,26}}{\ln \frac{0,265}{0,26}} = 114,614[^\circ\text{C}]$$

Válcová stěna D

- výpočet střední teploty $T_{stř23}$

$$T_{střD} = 143,24[^\circ\text{C}] - (143,24[^\circ\text{C}] - 114,63[^\circ\text{C}]) \frac{\ln \frac{0,2375}{0,215}}{\ln \frac{0,26}{0,215}} = 128,3[^\circ\text{C}]$$

Válcová stěna E

- výpočet střední teploty $T_{stř12}$

$$T_{střE} = 143,25[^\circ\text{C}] - (143,25[^\circ\text{C}] - 143,24[^\circ\text{C}]) \frac{\ln \frac{0,2115}{0,208}}{\ln \frac{0,215}{0,208}} = 143,245[^\circ\text{C}]$$

Hodnoty dopočítaných středních teplot v jednotlivých válcových stěnách jsou v tab. 6-3.

Tab. 6-3: Hodnoty středních teplot v jednotlivých válcových stěnách

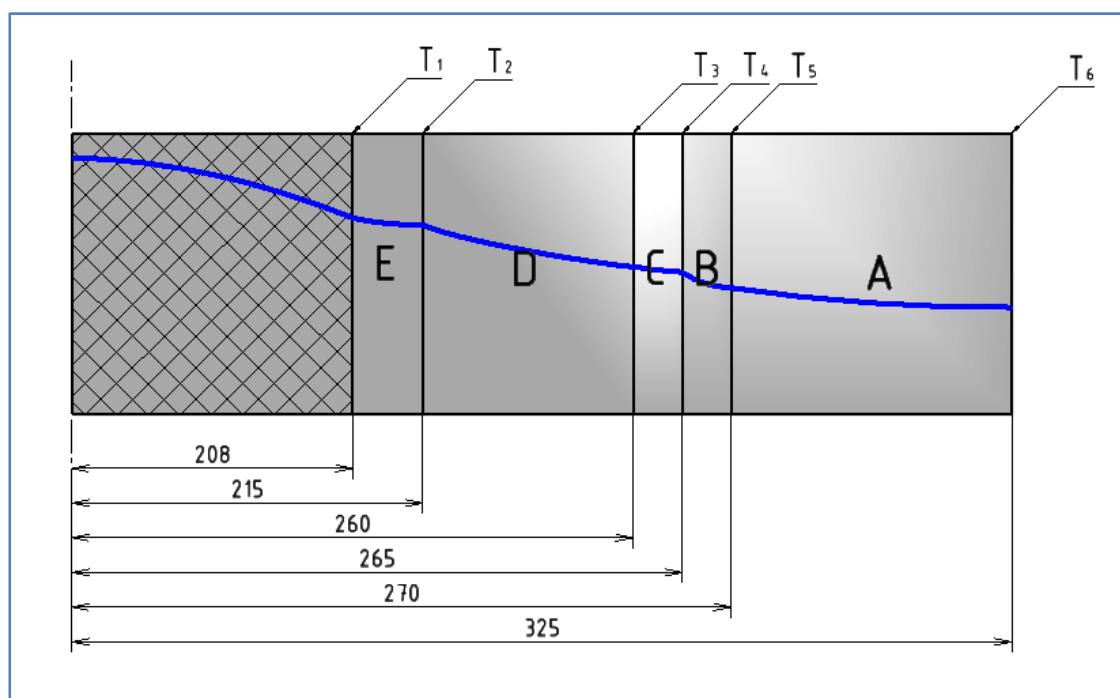
Stěna A [°C]	Stěna B [°C]	Stěna C [°C]	Stěna D [°C]	Stěna E [°C]
100,048	107,4	114,614	128,3	143,245

Na základě vypočtených teplot v hraničních bodech a středních teplot v konkrétních válcových stěnách se vykreslí přibližný teplotní průběh v ÚOS. Z předchozích výpočtů a z obrázku 6-9, je vidět, že největší příspěvek k přestupu tepla nebo největší změna difference teplot, je ve válcových stěnách vyplněných plynem. Ať už jde o helium či dusík. Velikosti gradientů teploty jsou uvedeny v tabulce 6-4.

Tab. 6-4: Hodnoty teplotních diferencí v jednotlivých válcových stěnách

Stěna A [°C]	Stěna B [°C]	Stěna C [°C]	Stěna D [°C]	Stěna E [°C]
0,2	28,67	0,03	14,5	0,1

Průběh teploty v objemovém zdroji tepla (oblast dvojité šrafovaná) je pouze přibližný. Není možné jej přesně určit, jednak proto, že není známa teplota v jeho ose nebo teplota na jeho povrchu a také proto, že neznáme jeho součinitel tepelné vodivosti. Ten není znám proto, že na objemový zdroj tepla se z důvodu zjednodušení nahlíží jako na tzv. černou skříňku.



Obr. 6-9: Teplotní průběh od osy ÚOS po vnější poloměr ÚOS

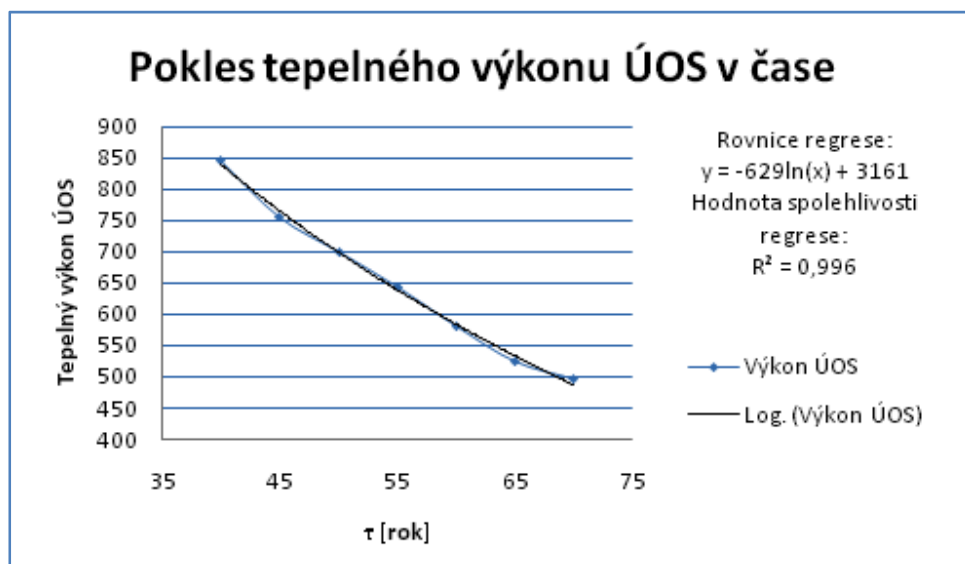
6.5 Změna teploty na povrchu ÚOS

V této části DP budou prozkoumány možnosti změny teploty T_6 . Teplota na povrchu ÚOS je uvažovaném zjednodušeném modelu závislá na těchto veličinách:

- \dot{Q} - tepelný výkon ÚOS
- Δ_i - poměr vnějšího a vnitřního poloměru jednotlivých válcových stěn
- λ_i - součinitelé tepelné vodivosti použitých materiálů

6.5.1 Změna pomocí tepelného výkonu Q

Na následujícím grafu 6-3 je zobrazen pokles teploty v čase. Autor neměl konkrétní hodnoty tepelného výkonu v čase a zvolil variantu odměření a následného přepočtu dle vhodně zvoleného měřítka. Po té byl v tabulkovém procesoru, dle těchto hodnot, vytvořen graf a následně proložen rovnicí regrese. Konkrétní rovnice regrese a hodnota její spolehlivosti je zobrazena v pravé horní části obr. 6-10.



Graf 6-3: Pokles tepelného výkonu ÚOS na době od vytažení PK z JR [2]

Je důležité připomenout, že rovnice regrese přímky se spolehlivostí 99,6 %, bude pravděpodobně platit pouze v intervalu pro $\tau \in \langle 40..70 \rangle$. Takže:

$$\dot{Q} = -629 \ln(\tau) + 3161 \quad \text{a} \quad \dot{Q} = \frac{T_1 - T_6}{\sum R} [1] \quad (37)$$

nebo:

$$-629 \ln(\tau) + 3161 = \frac{T_1 - T_6}{\sum R} \Rightarrow T_6 = T_1 - \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] \quad (38)$$

kde:

$T_6 [^\circ\text{C}]$ – teplota na povrchu ÚOS

$T_1 [^\circ\text{C}]$ – teplota na povrchu objemového zdroje tepla (PK)

$\sum R \left[\frac{K}{W} \right]$ - suma odporů uvažovaných materiálů proti vedení tepla

$\tau [rok]$ – doba od vyvezení paliva z JR

Dle [1] se suma odporů proti vedení tepla u složené válcové stěny v tomto případě vyjádří takto:

$$\sum R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (39)$$

a po rozepsání jednotlivých složek a dosazení:

$$\begin{aligned} \sum R &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\lambda_4} \ln \frac{r_5}{r_4} + \frac{1}{\lambda_5} \ln \frac{r_6}{r_5} \right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 3,265} \left(\frac{1}{210} \ln \frac{0,215}{0,208} + \frac{1}{0,17} \ln \frac{0,260}{0,215} + \frac{1}{18,85} \ln \frac{0,265}{0,260} + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{0,033} \ln \frac{0,270}{0,265} + \frac{1}{49,9} \ln \frac{0,325}{0,270} \right) = \\ &= 0,082 \left[\frac{K}{W} \right] \end{aligned}$$

Nyní se vyjádří teplota T_6 v závislosti na době od vyvezení VJP z reaktoru. Do rovnice (38) se postupně dosadí hodnoty τ_i (doba od vyvezení VJP) a to konkrétně v rocích.

- 40 let od vyvezení VJP z JR

$$\begin{aligned} T_6 &= T_1 - \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 143,25 [^{\circ}C] - 0,082 \cdot [-629 \ln(40) + 3161] = \\ &= 74,3 [^{\circ}C] \end{aligned}$$

- 45 let od vyvezení VJP z JR

$$\begin{aligned} T_6 &= T_1 - \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 143,25 [^{\circ}C] - 0,082 \cdot [-629 \ln(45) + 3161] = \\ &= 80,4 [^{\circ}C] \end{aligned}$$

Toto řešení nedává přesnou hodnotu. Bude-li se pokračovat ve výpočtu, pak z něj vyplyne, že při snižování tepelného výkonu se bude zvyšovat teplota na povrchu ÚOS. Je to z toho důvodu, že teplota na povrchu objemového zdroje tepla T_1 se vždy musí nastavit dle tepelného výkonu zdroje. Řešení bude pravděpodobně korektní v případě, pokud se bude změna vztahovat pouze k teplotní diferencí ΔT .

- 40 let od vyvezení VJP z JR

$$\begin{aligned} T_1 - T_6 &= \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 0,082 \cdot [-629 \ln(40) + 3161] = \\ &= 68,9 [^{\circ}C] \end{aligned}$$

Tento výsledek ve své podstatě vlastně říká že: Pro tepelný tok odpovídající hodnotě po 40 letech od vytažení z JR, který je uzavřen v ÚOS a musí projít odpory tohoto ÚOS, které odpovídají $\sum R$, pokud se tento tepelný tok má přenést, je zapotřebí aby se na vnější a vnitřní stěně nastavila tomu odpovídající difference teplot.

- 45 let od vyvezení VJP z JR

$$T_1 - T_6 = \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 0,082 \cdot [-629 \ln(45) + 3161] = 62,9 [^{\circ}\text{C}]$$

- 50 let od vyvezení VJP z JR

$$T_1 - T_6 = \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 0,082 \cdot [-629 \ln(50) + 3161] = 57,4 [^{\circ}\text{C}]$$

- 55 let od vyvezení VJP z JR

$$T_1 - T_6 = \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 0,082 \cdot [-629 \ln(55) + 3161] = 52,5 [^{\circ}\text{C}]$$

- 60 let od vyvezení VJP z JR

$$T_1 - T_6 = \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 0,082 \cdot [-629 \ln(60) + 3161] = 48,0 [^{\circ}\text{C}]$$

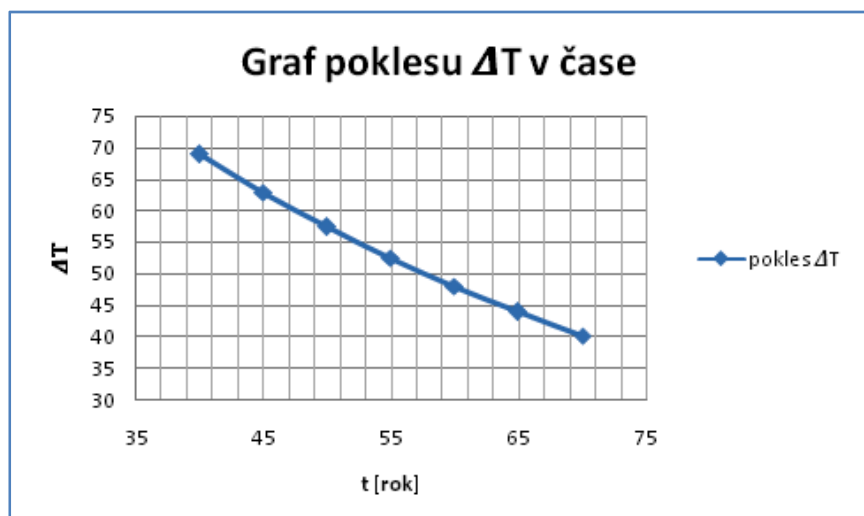
- 65 let od vyvezení VJP z JR

$$T_1 - T_6 = \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 0,082 \cdot [-629 \ln(65) + 3161] = 43,9 [^{\circ}\text{C}]$$

- 70 let od vyvezení VJP z JR

$$T_1 - T_6 = \sum R \cdot [-629 \ln(\tau) + 3161] = 0,082 \cdot [-629 \ln(70) + 3161] = 40,1 [^{\circ}\text{C}]$$

V následujícím grafu je zobrazena změna difference teplot v závislosti na změně doby skladování.



Graf 6-4: Změna ΔT válcových stěn ÚOS v závislosti na době skladování VJP

6.5.2 Změna teploty pomocí parametru Δ_i

Parametr Δ_i je v podstatě poměr poloměrů válcové stěny, který figuruje v rovnici pro výpočet tepelného toku. V této části výpočtu bude změna teploty na povrchu ÚOS funkcí pouze parametru, tedy $T_6 = f(\Delta_i)$.

Pro zjednodušení výpočtu bude uvažován ÚOS jako jednotné těleso. V podstatě jako válcová stěna odpovídající svým vnitřním a vnějším průměrem předchozímu zjednodušenému modelu. S tím rozdílem, že válcová stěna nebude dělená tak jako předchozí model.

Výpočet teploty T_6 bude proveden pro hodnoty odpovídající poměru vnějšího a vnitřního průměru ÚOS 650/208 mm a 1000/208 mm. Parametr Δ_i bude tedy nabývat hodnot pro $\Delta_1 = 1,5625$ a $\Delta_2 = 1,41$.

Upravená rovnice (37) pro výpočet T_6 :

pro $\Delta_i = 1,5625$, $\lambda = 50[\text{W/mK}]$ a $Q = 525 [\text{W}]$:

$$T_{6_ \Delta i \min} = T_1 - \dot{Q} \cdot R_{\Delta_i} = T_1 - \dot{Q} \cdot \frac{\ln(\Delta_i)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} = 143,5[^\circ\text{C}] - 0,512[-] \cdot \ln(1,5625) = 143,3[^\circ\text{C}]$$

pro: $\Delta_i = 1,57$, $\lambda = 50[\text{W/mK}]$ a $Q = 525 [\text{W}]$:

$$T_{6_ \Delta i \min} = T_1 - \dot{Q} \cdot R_{\Delta_2} = T_1 - \dot{Q} \cdot \frac{\ln(\Delta_2)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} = 143,5[^\circ\text{C}] - 0,512[-] \cdot \ln(1,57) = 142,7[^\circ\text{C}]$$

Z předchozího výpočtu je pravděpodobně zřejmé, že změnou tloušťky válcové stěny se příliš neovlivní teplota na povrchu ÚOS.

6.5.3 Změna teploty pomocí součinitele tepelné vodivosti λ

Tab. 2-3: Součinitelé tepelné vodivosti vybraných materiálů

Materiálové značení	Součinitel tepelné vodivosti λ při $T = 100^\circ\text{C}$
INCONEL 600	14,9 [W/mK] [15]
EN-GJS-500-7	35,2 [W/mK] [20]
EN-GJL-250	37,2 [W/mK] [21]
KYSLIČNÍK HLINITÝ – 94% Al_2O_3	18 [W/mK] [16]
AlMgSi0,5	210 [W/mK] [17]
No. 1.6338 – odpovídá: 15NiCuMoNb5	49,9 [W/mK] [18]
ČS 17.248	18,85 [W/mK] [19]

Poslední veličina, kterou je v tomto případě možno ovlivňovat teplotu na povrchu ÚOS je součinitel tepelné vodivosti λ . Uvažuje se, že materiál má izotropní vlastnosti, tj. že vlastnosti materiálu jsou ve všech směrech stejné. Součinitel tepelné vodivosti se bude pohybovat v intervalu hodnot příslušných předem zvolených materiálů.

Bude proveden výpočet pro změnu teploty T_6 pro minimální a maximální hodnotu součinitele tepelné vodivosti a to $\lambda_{\min} = 14,9 [W/mK]$ a $\lambda_{\max} = 210 [W/mK]$. Součinitel tepelné vodivosti nebude změněn v těchto mezích pouze ve válcových stěnách, které jsou tvořeny plynem. Viz tabulka 2-3.

- Výpočet teploty T_6 pro $\lambda_{\min} = 14,9 [W/mK]$

Suma odporů proti vedení tepla:

$$\begin{aligned}\Sigma R_{\lambda_{\min}} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_{He}} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_{\min}} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\lambda_N} \ln \frac{r_5}{r_4} + \frac{1}{\lambda_{\min}} \ln \frac{r_6}{r_5} \right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 3,265} \left(\frac{1}{14,9} \ln \frac{0,215}{0,208} + \frac{1}{0,17} \ln \frac{0,26}{0,215} + \frac{1}{14,9} \ln \frac{0,265}{0,26} + \frac{1}{0,033} \ln \frac{0,27}{0,265} + \frac{1}{14,9} \ln \frac{0,325}{0,27} \right) = \\ &= 0,083 \left[\frac{K}{W} \right]\end{aligned}$$

a teplota na povrchu ÚOS:

$$T_{6_{\lambda_{\min}}} = T_1 - \dot{Q} \cdot \Sigma R_{\lambda_{\min}} = 143,5 - 525 \cdot 0,083 = 99,9 [^{\circ}C]$$

- Výpočet teploty T_6 pro $\lambda_{\min} = 210 [W/mK]$

Suma odporů proti vedení tepla:

$$\begin{aligned}\Sigma R_{\lambda_{\min}} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\frac{1}{\lambda_{\max}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_{He}} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_{\max}} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\lambda_N} \ln \frac{r_5}{r_4} + \frac{1}{\lambda_{\max}} \ln \frac{r_6}{r_5} \right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 3,265} \left(\frac{1}{210} \ln \frac{0,215}{0,208} + \frac{1}{0,17} \ln \frac{0,26}{0,215} + \frac{1}{210} \ln \frac{0,265}{0,26} + \frac{1}{0,033} \ln \frac{0,27}{0,265} + \frac{1}{210} \ln \frac{0,325}{0,27} \right) = \\ &= 0,082 \left[\frac{K}{W} \right]\end{aligned}$$

a teplota na povrchu ÚOS:

$$T_{6_{\lambda_{\min}}} = T_1 - \dot{Q} \cdot \Sigma R_{\lambda_{\min}} = 143,5 - 525 \cdot 0,082 = 100,5 [^{\circ}C]$$

Tudíž při změně součinitele tepelné vodivosti o více jak 10-ti násobek (z hodnoty 14,9 [W/mK] na hodnotu 210 [W/mK]), se změni teplota na povrchu ÚOS pouze o 0,6 [°C].

6.6 Numerický model přestupu tepla

K vytvoření numerického výpočtového modelu přestupu tepla, bylo použito programu Star-CCM+ verze 3.02.003. Ústav zajišťují softwarovou licenci: Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

6.6.1 Charakteristika programu Star-CCM++

Program Star-CCM++ pracuje metodou konečných objemů je vytvořen na bázi CFD.

„CFD (Computational Fluid Dynamics) je nástroj využívající počítače k simulacím chování systémů, které zahrnuje proudění tekutin, sdílení tepla, spalování, fázové přeměny a další fyzikální děje. Je založena na řešení rovnic mechaniky tekutin ve výpočtové oblasti se specifikovanými okrajovými, respektive počátečními podmínkami“. [22].

Seznam možných použití CFD v různých odvětvích je následující:

Převzato z [22].

Používá se například pro simulaci aerodynamiky vozidel, letadel. Dále pro proudění v motorech ať už spalovacích nebo tryskových. Další poměrně velké využití je v lopatkových strojích (např. čerpadla), sdílení tepla, procesní inženýrství (např. chemické reakce), životní prostředí (např. šíření škodlivin), v meteorologii, v biomedicině a také například pro simulaci proudění plazmatu.

Základní etapy CFD:

Převzato z [22].

- Pre-processing (přípravná fáze):
 - definice geometrie výpočtové oblasti
 - volba fyzikálního modelu
 - specifikace fyzikálních vlastností proudícího média
 - specifikace okrajových podmínek
 - tvorba výpočtové sítě
- Processing-Solution (fáze řešení):
 - vlastní numerické řešení
- Post-processing (analytická fáze):
 - vizualizace výpočtové oblasti a sítě
 - tvorba vektorových obrázků
 - vizualizace skalárních veličin
 - tvorba grafů
 - kvalitativní numerické výpočty
 - tvorba animací

Prvky CFD simulace:

Převzato z [22].

- „*Kontinuum je diskretizováno, tj. proměnné proudového pole jsou aproximovány svými hodnotami v konečném počtu uzlů*“.
- „*Rovnice jsou diskretizovány: diferenciální/integrační rovnice (kontinuum) \rightarrow algebraické rovnice (diskrétní)*“.
- „*Systém algebraických rovnic je řešen s cílem získat hodnoty proměnných v uzlech*“.

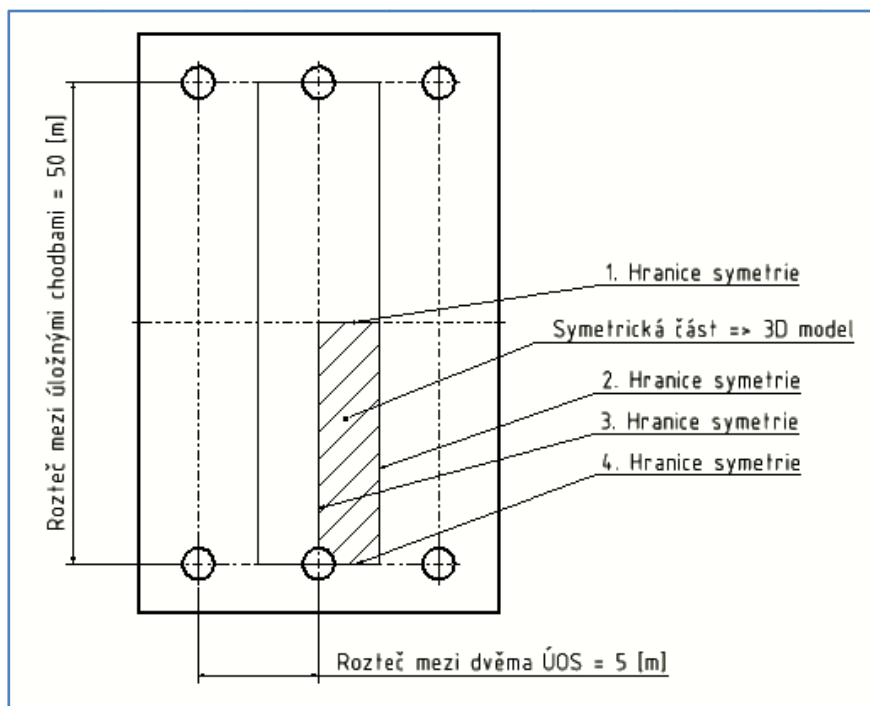
6.6.2 3D model

Vytvoření každého modelu probíhalo podle stejného postupu v programu Star-Design. Tento program je doplňkem pro aplikaci Star-CCM++.

Model byl koncipován jako sestava, tzn., že každá součást byla vytvořena samostatně. Po dokončení modelu je zapotřebí ho uložit do příslušného formátu pro následný export do simulačního programu Star-CCM++.

6.6.3 Vytvoření simulace a modelu

V programu Star-CCM++ byla vytvořena nová simulace. Nyní se musí importovat povrch příslušného modelu. V tabulce importu se provede nastavení podmínek pro hranice a oblasti

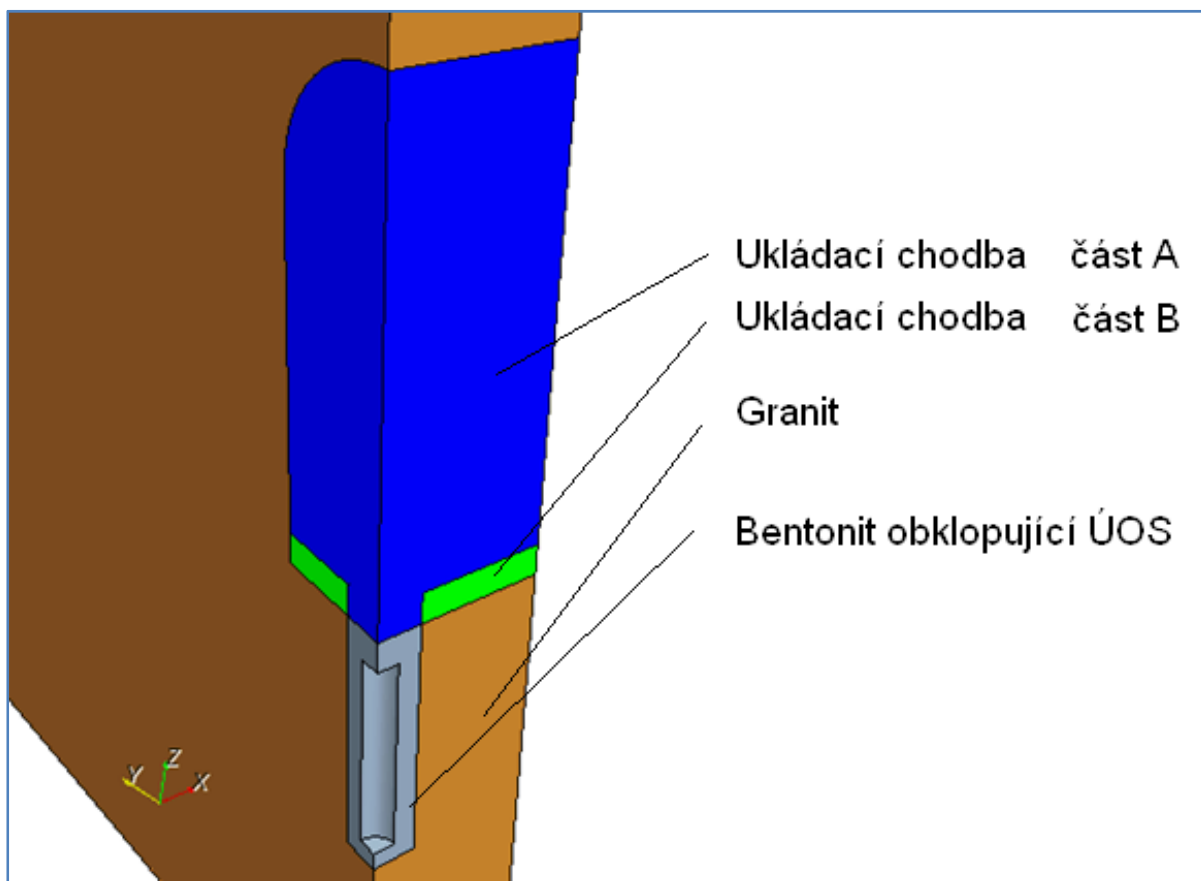


Obr. 6-10: Zobrazení symetrií v okolí ÚOS

objektu. Importovaný 3D model se zobrazením souřadného systému a popisem hlavních částí je na obr. 6-11. Tento model je vlastně jedna čtvrtina elementu obklopující ukládací hnízdo viz obr. 6-10. Ukládací chodba je v modelu rozdělena dvě části. To z toho důvodu, že při vytváření sítě nebylo možné nadefinovat hranici mezi tvarem spodní části ukládací chodby a tvarem vrchní části bentonitové

výplně. Bentonitová výplň byla z důvodu

zjednodušení spojena do jedné části. V případě, že by se uvažovalo zvlášť horní a spodní víko, přibude v numerickém modelu řada dalších složitostí, např. nadefinování spojitosti oblastí se stejnými fyzikálními vlastnostmi



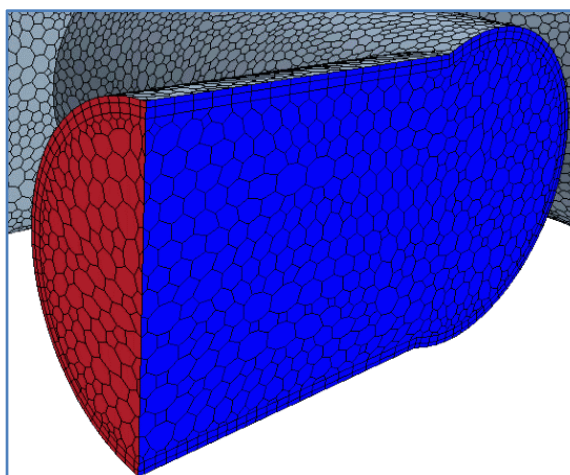
Obr. 6-11: Detailní pohled na hlavní část 3D modelu

6.6.4 Modelový prostor

Čerpáno z [23].

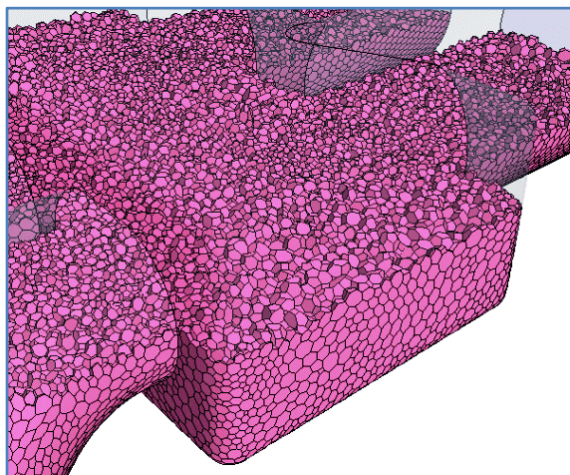
Po vložení povrchu modelu nadefinujeme síťové kontinuum. Pro vytvoření sítě bylo použito těchto síťových modelů a to:

Prism layer mesher – prizmatická vrstva sítě, která je složena z ortogonálních prizmatických buněk, jež bývají v objemové síti v blízkosti povrchu. Používá se k přesnému simulování turbulence a přestupu tepla. Princip je, že dříve než se vytvoří jádro sítě, je podpovrchová síť vytvořena specifikovanou tloušťkou prizmatické vrstvy. Ta je vytvořena buď jako „sevřená“ (pro interní toky) nebo jako „rozšířená“ (pro externí toky). Jádro sítě je pak vytvořeno pomocí podpovrchové sítě. Prizmatická vrstva sítě je potom vygenerována pomocí vysunutí stěny buňky z jádra zpět k původnímu povrchu. Na obr. 6-12 jsou zobrazeny dvě prizmatické vrstvy v těsné blízkosti povrchu.



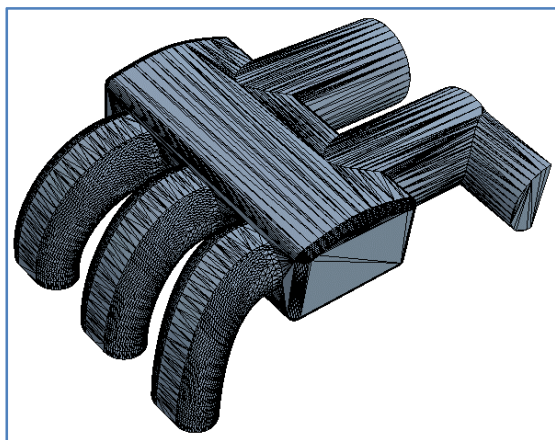
Obr. 6-12: Zobrazení prizmatické vrstvy v blízkosti povrchu [23]

Polyhedral mesher – mnohostěnná síť poskytuje vyvážené řešení pro komplexní síťové problémy. Dá se relativně snadně vytvořit, nevyžaduje příliš úprav povrchu modelu. Umožňuje vytvořit více-oblastní síť se shodným síťovým rozhraním. Mnohostěnný síťový model použije tvar libovolné mnohostěnné buňky k vytvoření jádra sítě. Mnohostěnné buňky jsou typicky vytvořeny ze čtrnácti stěn. Je také možno zmenšit nebo zvětšit hustotu jádra mnohostěnné sítě. Na obr. 6-13 je náhled na jádro mnohostěnné sítě.

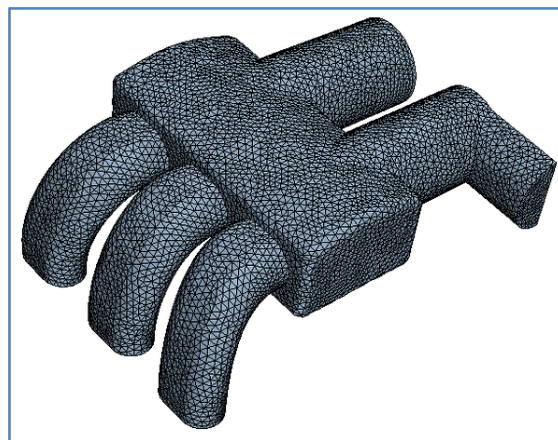


Obr. 6-13: Zobrazení jádra mnohostěnné sítě [23]

Surface remesher – tento model umožňuje přeměření existujícího povrchu k tomu, aby zlepšil jeho celkovou kvalitu a optimalizoval ho pro objemovou síť. Přesítování povrchu je primárně založeno na cílové délce hrany, jež je předem dána a zahrnuje také zjemnění, založené na zaoblení a povrchovém přiblížení. Lokální jemnost založená na hranicích objektu může být taktéž zahrnuta do optimalizace. Specifické hranice mohou být vynechány z procesu síťování tak, že původní přeměření povrchu z vložené sítě může být zachováno. Na obr. 6-14 je znázorněna původní síť povrchu a obr. 6-15 je přesítovaný povrch.



Obr. 6-14: Síť importovaného povrchu [23]



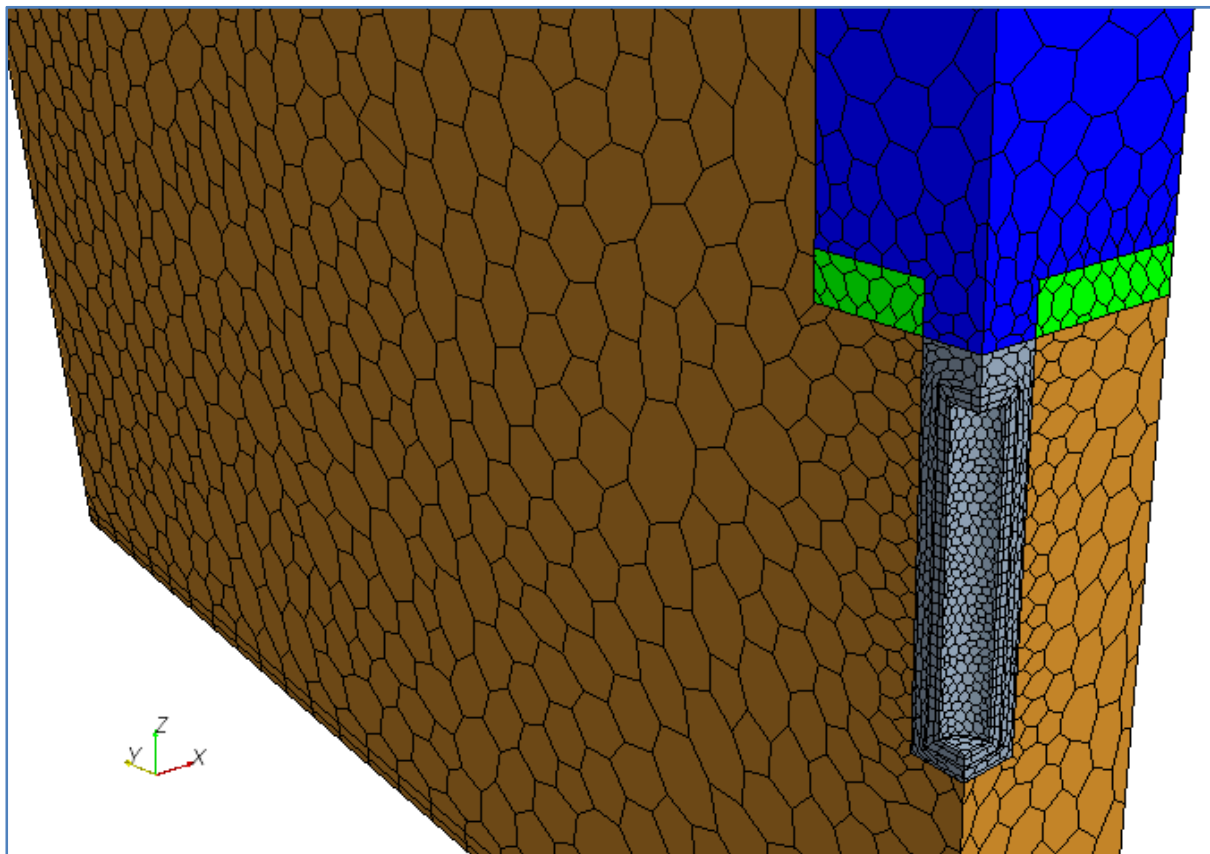
Obr. 6-15: Přesítovaný povrch [23]

Nyní se vytvoří na 3D modelu síť. Základní parametry sítě jsou následující:

Síť 1: oblast – Ukládací chodba, Granit => velikost buňky 0,1 [m]

Síť 2: oblast – Bentonit v ukládacím hnízdě => velikost buňky 0,05 [m]

Z důvodu toho, že tepelný tok bude vstupovat do modelu povrchem bentonitu, který obklopuje ÚOS, použije se při vytvoření sítě 2 u povrchu, dvou prizmatických vrstev. To proto, aby v místě vstupu tepelného toku bylo dosaženo přesné hodnoty. Vygenerovaná síť je zobrazena na obr. 6-16.



Obr. 6-16: Síť 3D modelu

6.6.5 Okrajové podmínky

Zjednodušující předpoklady pro numerické řešení teplotního pole z ÚOS do okolního prostředí:

1. Dle [2] je známo, že tepelný výkon PK a tím i ÚOS bude s časem klesat. Vezme se tedy v úvahu hodnota tepelného výkonu a to konkrétně 65 let po vytažení PK z jaderného reaktoru. Úloha se tímto může řešit jako **stacionární**. Této podmínky se v numerickém modelu dosáhne použitím funkce steady viz níže.

$$\frac{dT}{d\tau} = 0$$

2. Součinitelé tepelné vodivosti λ všech uvažovaných materiálů se nebudou měnit s teplotou. Materiál bude izotropní, tj. že vlastnosti materiálu jsou ve všech směrech stejné.

6.6.6 Fyzikální modely

Jelikož je uvažován pouze přestup tepla vedením, bylo na všechny oblasti modelu použito stejných fyzikálních modelů a to:

- Three dimensional – řešení bude provedeno jako 2D přestup tepla vedením.
- Stationary – stacionární model se používá pro simulace, u kterých nevzniká pohyb sítě (model nerotuje) a u těch kde jsou všechny souřadnicové systémy stacionární, tedy nezávislé na čase.

- **Solid** – model používaný pro čistě pevné těleso a jeho parametry.
- **Segragated solid energy** – oddělený řešič energie.
- **Steady** – používá se k řešení úloh v ustáleném stavu, když je aktivován tento model, je použití funkce časových kroků bezvýznamné.
- **Constant density** – vytvoří předpoklad k tomu, že hustota je neměnná v celém kontinuu.

Odlišné nastavení se provede pouze v modelu solid. Zde se nastaví hodnoty součinitelů tepelných vodivostí pro konkrétní materiály.

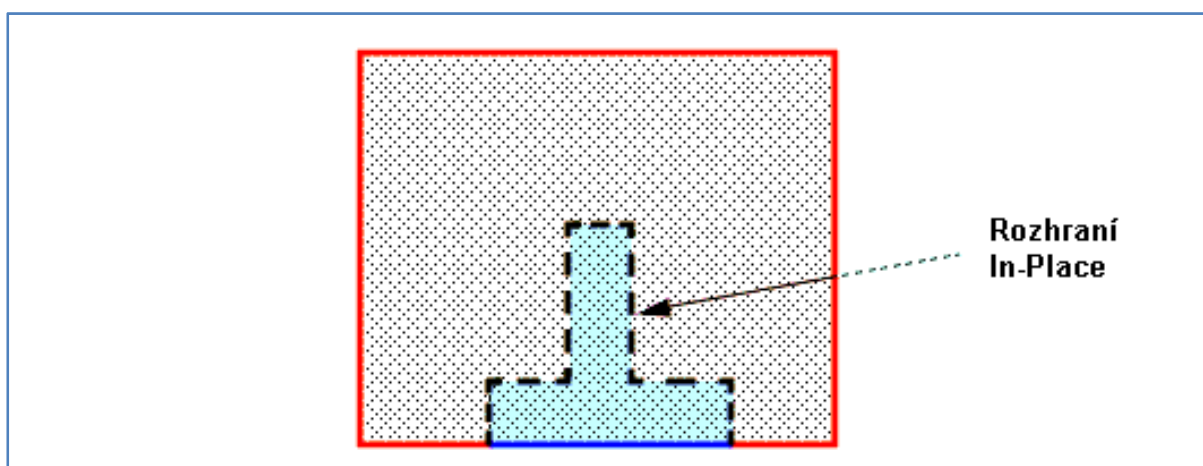
6.6.7 Hraniční podmínky

Všechny hranice oblastí byly definovány následujícími typy modelů:

- **Wall** – má fyzikální vlastnosti stěny.
- **Symmetry plane** – reprezentuje imaginární plochu symetrie v simulaci. Řešení získané pomocí podmínky symetrické roviny je identické s řešením, které by bylo získáno zrcadlením sítě okolo roviny souměrnosti. V tomto případě jde vlastně o shodu s podmínkou adiabatické hranic

Rozhraní v místě styku dvou oblastí bylo definováno funkcí In-Place.

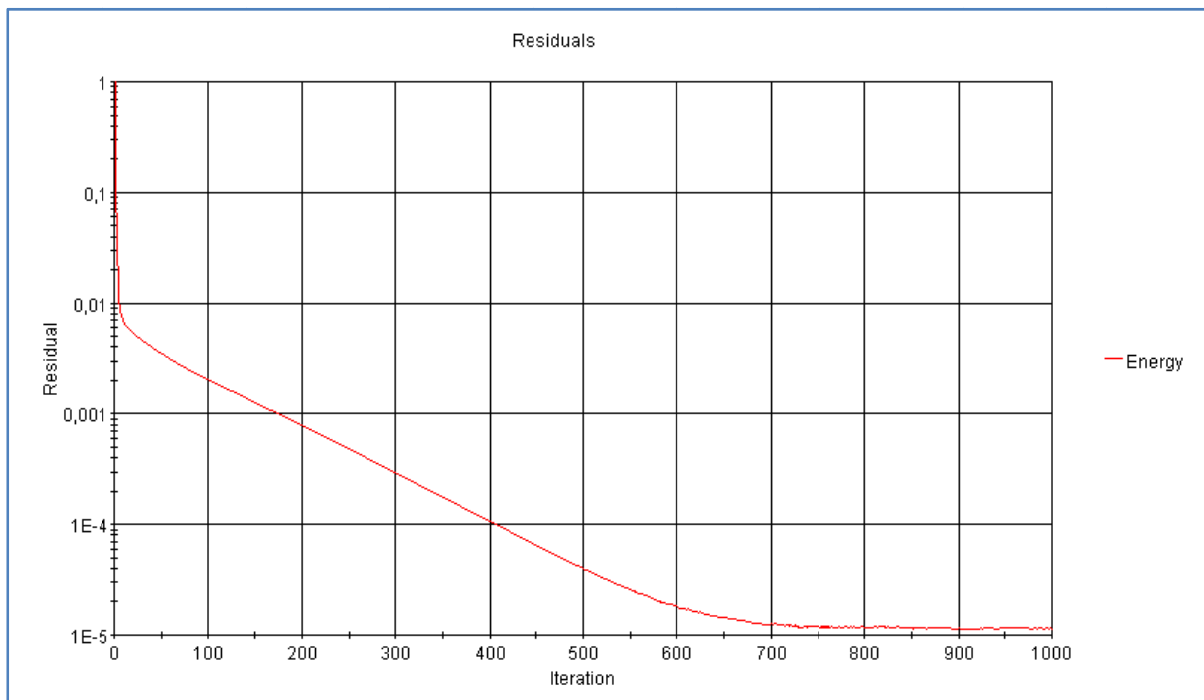
- **In-Place** – je rozhraní v místě styku, které je definováno tak, že v prostoru mezi dvěma hranicemi, neexistuje žádné fyzické odloučení. Obě styčné oblasti obsahují stejnou podmínku.



Obr. 6-17: Rozhraní In-Place [20]

6.6.8 Parametry výpočtu

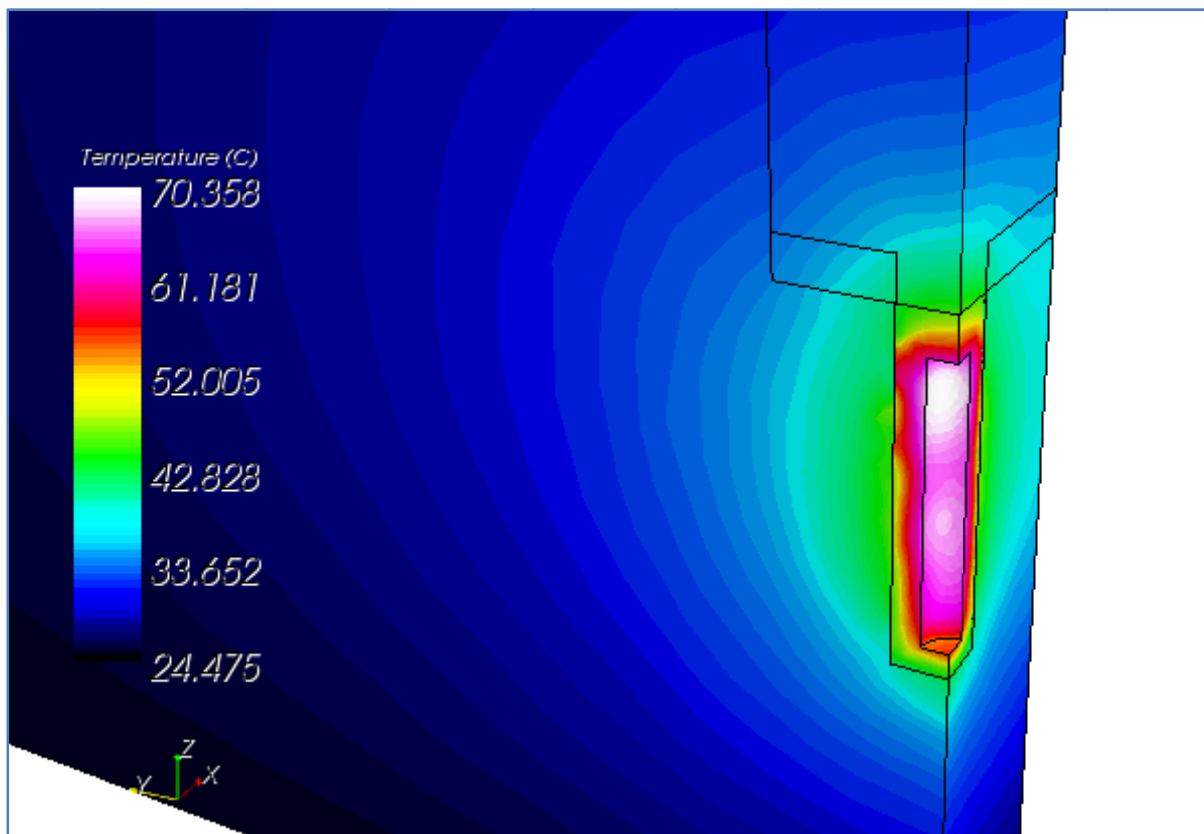
Před spuštěním výpočtu se ještě musí nastavit počet iterací výpočtu. V tomto případě začne výpočet konvergovat přibližně po 700 iteracích. Na základě toho byl nastaven konečný počet iterací výpočtu na 1000. Zobrazení počtu iterací v závislosti na konvergenci (residua) zbytku při výpočtu je v grafu 6-6.



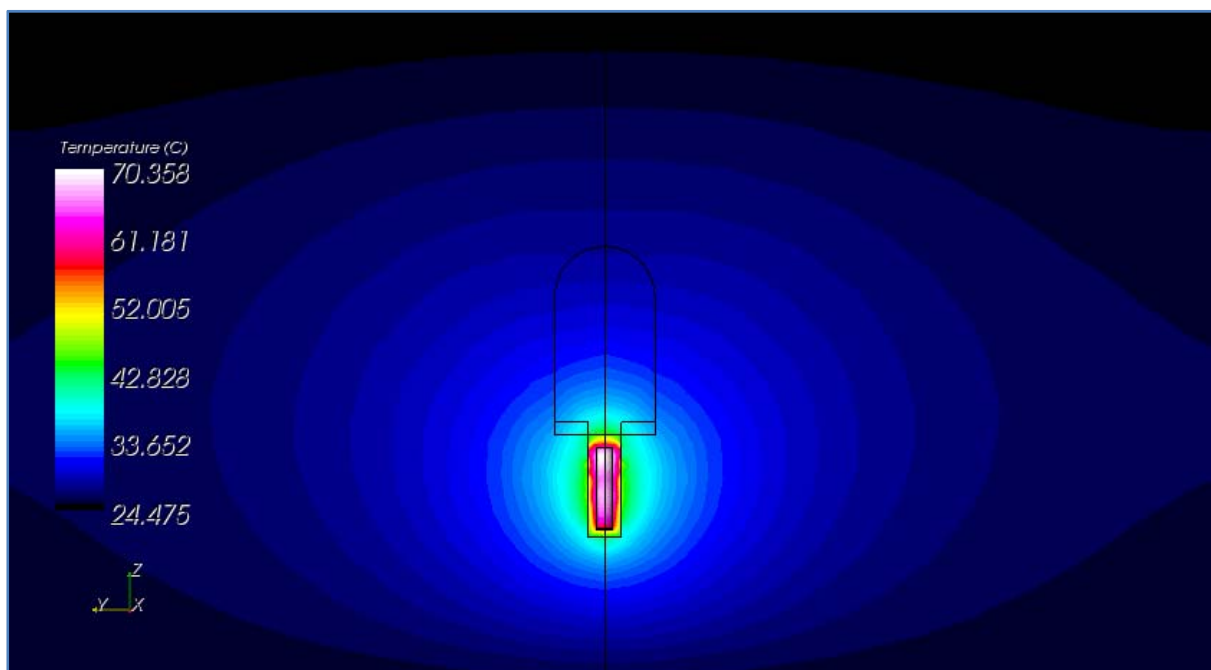
Graf. 6-6: Zobrazení konvergence residua (zbytků)

6.6.9 Teplotní profil

Perspektivní pohled na teplotní profil v 3D modelu je zobrazen na obr. 6-19. Na obr. 6-20 je zobrazení teplotního profilu v ÚOS a jeho okolí v rovině Y-Z.

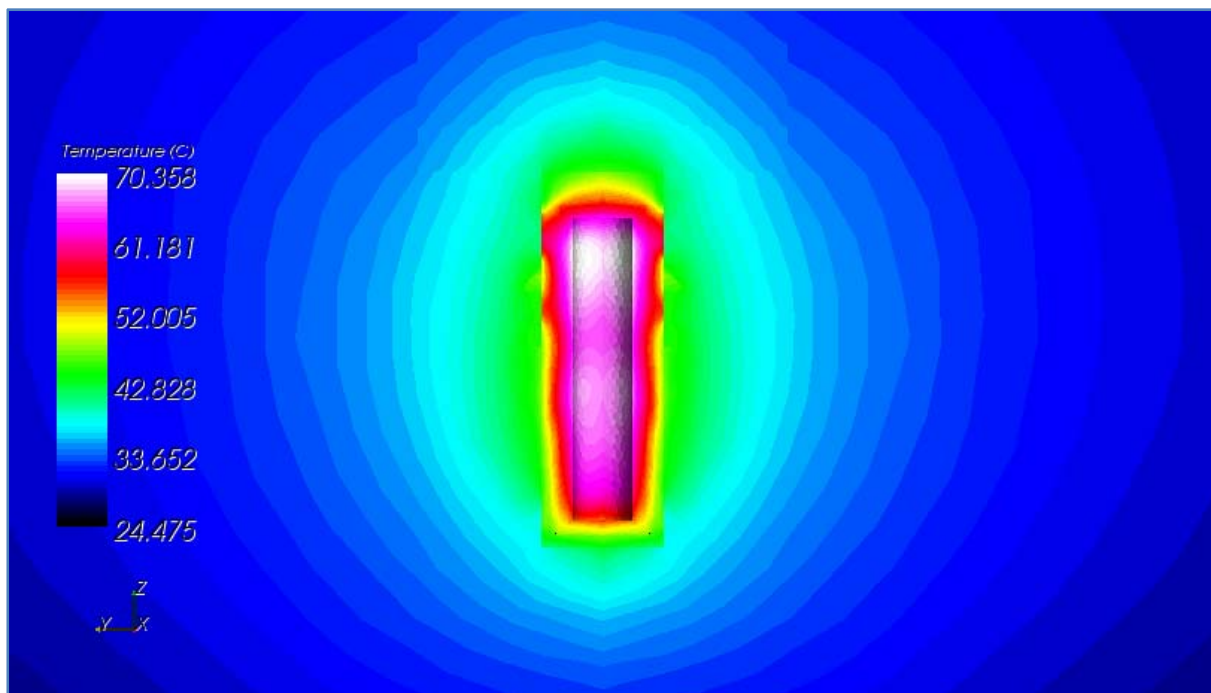


Obr. 6-19: Detail 3D teplotního profilu pro okolí ukládacího vrtu s uvažováním zjednodušeného modelu ÚOS pro VVER 440 s tepelným výkonem 525 W



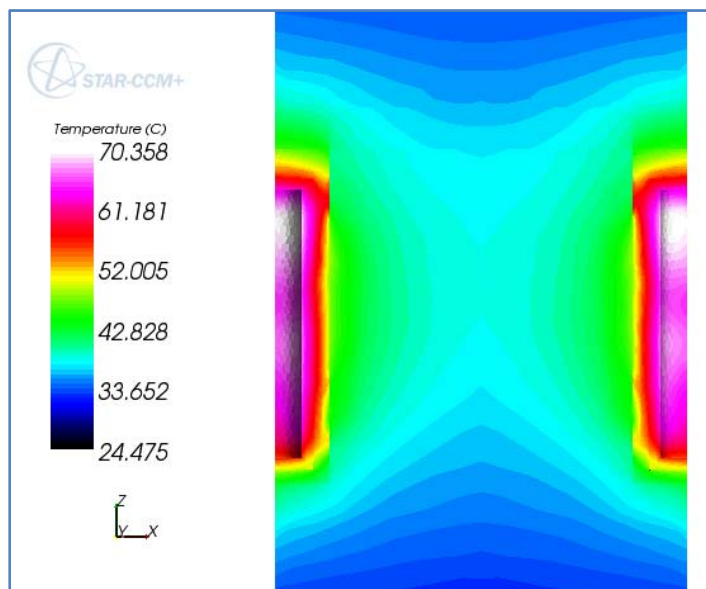
Obr. 6-20: Zobrazení teplotního profilu v okolí ÚOS v rovině Y-Z

Na předchozích dvou obrázcích jsou v levém dolním rohu zobrazeny souřadné systémy, kde osa +Y směřuje doleva, osa +Z vzhůru a osa +X do obrázku. V kladném směru osy Y je zobrazen teplotní profil mezi dvěma ukládacími chodbami vzdálenými od sebe o 50 m. Ve směru +Z je zemský povrch a obráceně -Z směřuje do jádra Země. Osa X je totožná s osou ukládací chodby. Toto značení bylo zachováno pro všechny následující modely. Na následujícím obr. 6-21 je detailní pohled v rovině Y-Z na teplotní profil v okolí vertikálního ukládacího hnízda.

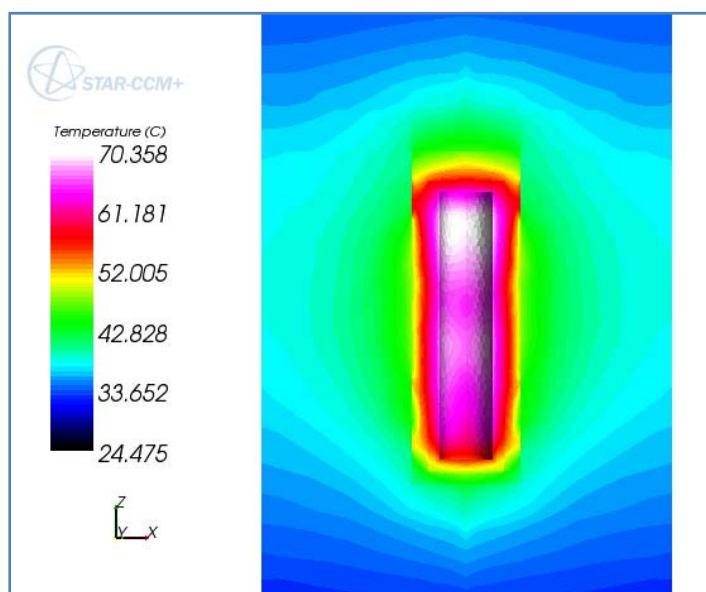


Obr. 6-21: Detailní pohled na teplotní profil v okolí ÚOS (rovina Y-Z)

Na obr. 6-22 a 6-23 jsou zobrazeny teplotní profily v rovině X-Z, tj. v okolí vertikálního vrtu v prvním případě a mezi dvěma ÚOS umístěnými za sebou ve stejné ukládací chodbě, s roztečí odpovídající velikosti „technologického minima“ (5 m), při tepelném výkonu jednoho ÚOS 525 W.

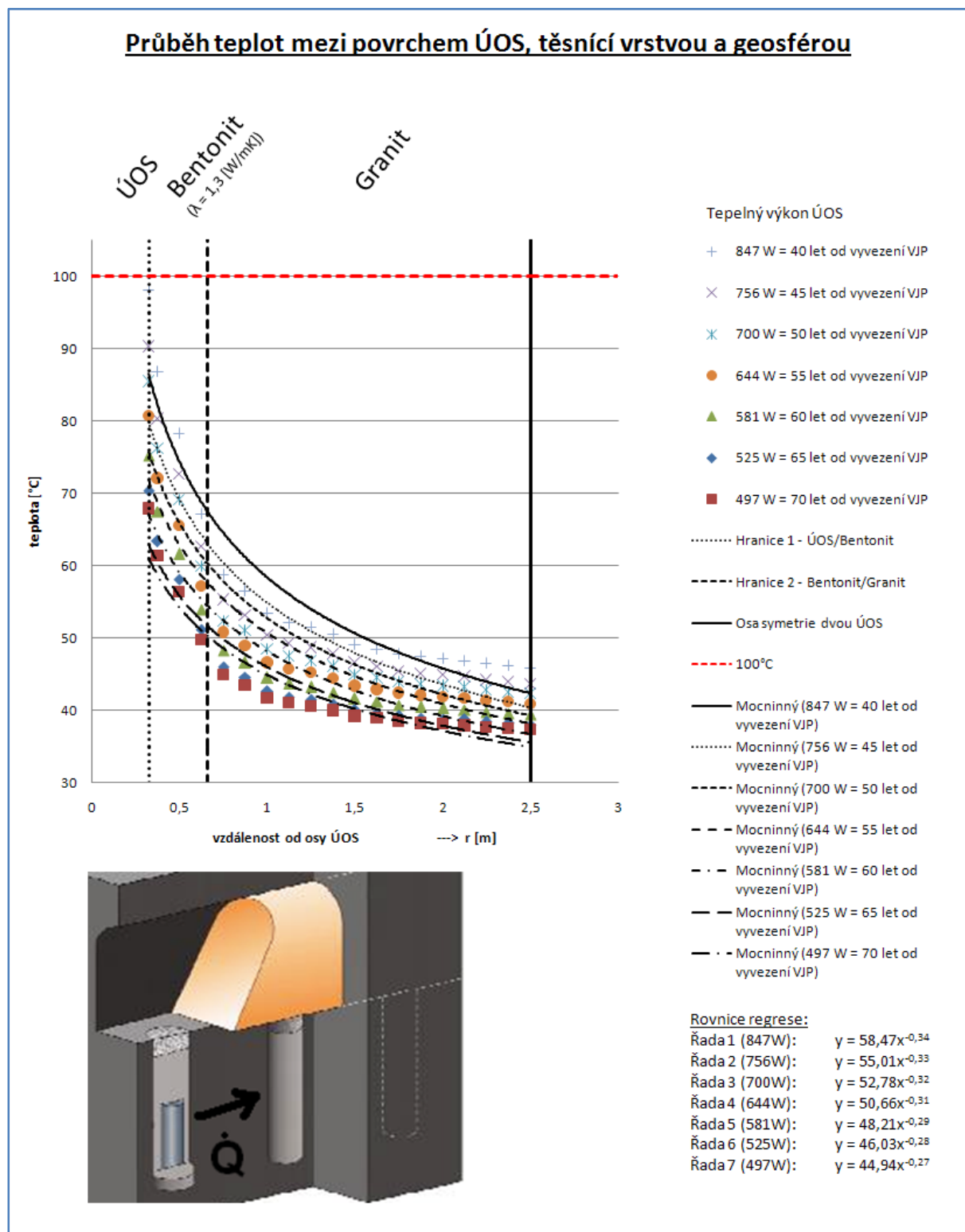


Obr. 6-23: Teplotní profil mezi dvěma ÚOS (rovina X-Z)



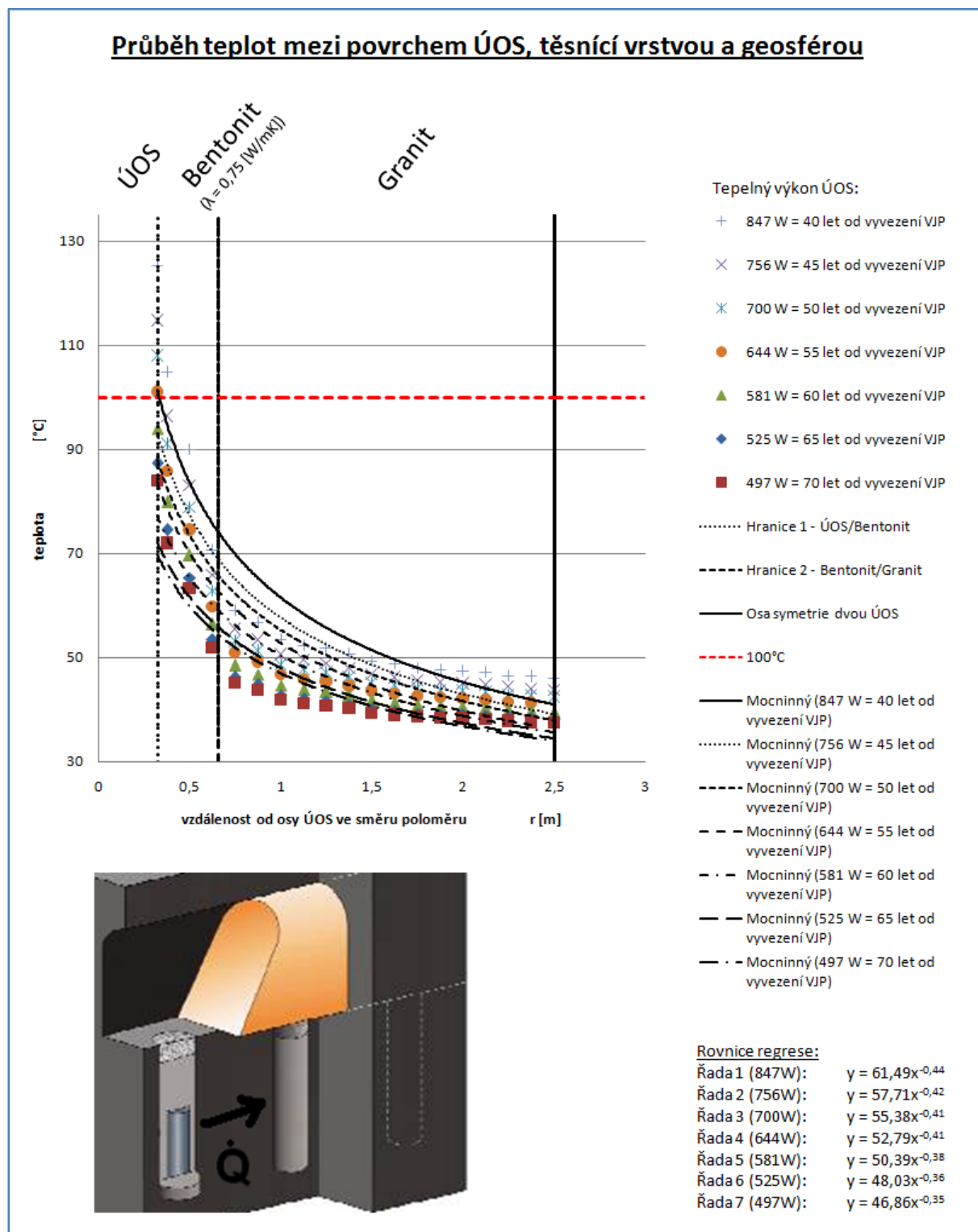
Obr. 6-22: Teplotní profil v okolí ÚOS (rovina X-Z)

Na základě toho postupu bylo vytvořeno přibližně 20 zjednodušených numerických modelů. Každý jednotlivý model měl shodné geometrické parametry, fyzikální modely, i okrajové podmínky. Lišili se pouze v nastavení vlastností ve fyzikálních modelech, případně vlastností hraničních podmínek jako např. hodnota měrného tepelného toku, součinitele tepelné vodivosti a volby počtu iterací výpočtu. Na základě výstupů z těchto zjednodušených modelů byly sestaveny dva komplexní grafy. Graf 6-7 zobrazuje závislost změny teplotního profilu na hodnotě tepelného výkonu ÚOS při uvažování bentonitových prefabrikátů pro jeho zatěsnění. Graf 6-8 zobrazuje stejnou závislost teplotního profilu, ale při použití bentonitu ve formě prášku.



Graf 6-7: Zobrazení tepelného profilu mezi povrchem jednoho ÚOS a osou symetrie druhého ÚOS (Prefabrikovaný bentonit)

V pravé části grafu je zobrazena legenda. Pod ní jsou příslušné rovnice regresních křivek, proložených hodnot. V levé spodní části, je pro orientaci zobrazen způsob příslušného uložení ÚOS.



Graf 6-8: Zobrazení teplotního profilu mezi povrchem jednoho ÚOS a osou symetrie druhého ÚOS (Bentonit ve formě prášku)

V pravé části grafu je zobrazena legenda. Pod ní jsou příslušné rovnice regresních křivek, proložených hodnot. V levé spodní části, je pro orientaci zobrazen způsob příslušného uložení ÚOS.

6.7 Dílčí závěr

Přestup tepla v ÚOS a jeho vliv na okolí byl řešen dvěma přístupy. V tom prvním byl výpočetní model sestaven pomocí analytického řešení. V druhém případě pomocí numerického modelu výpočetním programem Star-CCM++. Oba zvolené přístupy mají své typické rysy. Analytický model je rychlý, levný a přesný, ale má omezené možnosti. Je také podmíněn mj. výbornými matematickými a fyzikálními schopnostmi příslušného řešitele. Naproti tomu numerický model je relativně rychlý (omezení výkonem hardwaru), zvládá detailní analýzu i s případy „co kdyby?“, ale vyžaduje odborníka (práce se softwarovým prostředím a tvorbou modelů). V této práci byl analytický model výpočtu použit pro znázornění teplotního profilu v ÚOS a pro posouzení změny teploty na povrchu ÚOS v závislosti na změně tepelného výkonu, průměru a změně materiálu tj. na součiniteli tepelné vodivosti. Analytické řešení bylo provedeno na základně rozsáhlých zjednodušení, které jsou velmi dostačující pro pochopení základních principů přestupu tepla. Díky tomuto řešení bylo přibližně zjištěno, že změna materiálů pro konstrukci ÚOS z hlediska přestupu tepla nemá téměř žádný vliv na hodnotu teploty na povrchu ÚOS. Totéž platí pro zjednodušený výpočet změny průměru ÚOS (zvětšení tloušťky válcových stěn). V případě, že se tedy uvažuje konstrukce ÚOS z kovových či ocelových materiálů, pak z hlediska přestupu tepla pravděpodobně nedojde k příliš velkým změnám teplot na povrchu ÚOS. Navazující numerický model byl použit pro simulaci teploty v okolí ukládacího vrtu. Bylo vytvořeno přibližně 20 modelů, pro simulaci teplot při různé hodnotě tepelného výkonu ÚOS, pro různé hodnoty rozteče mezi ÚOS. Při různém způsobu utěsnění ÚOS ve vertikálním vrtu. Výstupy z numerického modelu byly následně zpracovány v tabulkovém procesoru. Z těchto výstupů byly následně sestaveny grafy 6.7 a 6.8, kde jsou zobrazeny průběhy teploty v rozmezí ÚOS – Bentonit – Geosféra.

7 Návrh rozteče mezi dvěma ÚOS

Referenční velikost rozteče mezi dvěma ÚOS v ukládací chodbě je dle [2] označena jako tzv. „technologické minimum“ (dále jen TM) a má hodnotu 5 m. Je to vzdálenost, při které nedojde k destrukci hostitelské horniny. V prvním případě budou určeny požadované doby skladování VJP před uložením do hlubinného úložiště, tak aby teplota na povrchu ÚOS nepřesáhla limitní hodnotu 100°C. Dále pak bude vyjádřena změna velikosti rozteče v závislosti na době skladování VJP.

7.1.1 Minimální doba skladování VJP před uložením do HÚ

Určení minimální doby skladování VJP před uložením do HÚ, bude řešeno pro rozteč, která se rovná technologickému minimu, tj. 5 m a pro případ zatěsnění vrtu s ÚOS bentonitovými prefabrikáty ($\lambda = 1,3 \text{ W/mK}$) a sypaným bentonitem ($\lambda = 0,75 \text{ W/mK}$).

Z grafu 6-7 v kap. 6 je zřejmé, že pro ÚOS s tepelným výkonem 847 W, který je v ukládacím vrtu utěsněn bentonitovými prefabrikáty, byla vypočtena hodnota teploty na rozhraní ÚOS/Bentonit 98,1 °C. Z tohoto plyne, že minimální potřebná doba pro skladování VJP, se bude pohybovat kolem 40 let.

Pro ÚOS zatěsněný práškovým bentonitem, bude tato doba podstatně větší. Pro ÚOS s tepelným výkonem 644 W, byla vypočtena teplota na rozhraní ÚOS/Bentonit 101 °C. Tudíž doba pro skladování před uložením VJP do HÚ, při zatěsnění ÚOS práškovým bentonitem, bude přibližně okolo 55 let, viz graf 6-8.

7.1.2 Změna rozteče mezi dvěma ÚOS v závislosti na tepelném výkonu a způsobu utěsnění vrtu

Změna rozteče bude řešena pro ÚOS pro VVER 440 s tepelným výkonem 644 W, který odpovídá skladování VJP po dobu 55 let. Byly určeny dva případy změny rozteče a to pro zkrácení doby skladování o 5 let a prodloužení doby skladování VJP o 5 let.

V grafu 6-7 jsou zobrazeny průběhy odpovídající výkonům 644 W, 581W a 700 W proloženy regresními přímkami. Z rovnice regrese pro řadu 4 (viz graf 6-7) se vypočte teplota v polovině délky rozteče (TM). Tato veličina je výpočtu označena symbolem X_2 . Pro snížení doby skladování VJP o 5 let se tato teplota dosadí do rovnice regrese pro řadu 3, z níž se vypočítá hodnota rozteče X_2 mezi dvěma ÚOS pro hodnotu tepelného výkonu odpovídající skladování VJP po dobu 50 let. Tento postup je shodný i v případě prodloužení doby skladování, teplota vypočtená z rovnice regrese pro řadu 4 se nyní dosadí do rovnice regrese řady 5.

Změna rozteče při zkrácení doby skladování o 5 let (prefabrikovaný bentonit):

Rovnice regrese pro řadu 4:

$$y = 50,66 \cdot x^{-0,31}$$

Výpočet teploty Y_1 :

$$Y_1 = 50,66 \cdot X_2^{-0,31} = 50,66 \cdot 2,5^{-0,31} = 38,13 [^{\circ}\text{C}]$$

kde:

Y_1 – teplota ve vzdálenosti X_2 odpovídající tepelnému výkonu 644 W při zatěsnění ÚOS prefabrikovaným bentonitem [$^{\circ}\text{C}$]

X_2 – $\frac{1}{2}$ délky rozteče mezi dvěma ÚOS [m]

Rovnice regrese pro řadu 3:

$$y = 52,78 \cdot x^{-0,32}$$

Změna X_2 při zkrácení doby skladování VJP o 5 let:

$$Y_1 = 52,78 \cdot (X_{2_{-5let}})^{-0,32} \Rightarrow X_{2_{-5let}} = \left(\frac{Y_1}{52,78} \right)^{-\frac{1}{0,32}} = \left(\frac{38,13}{52,78} \right)^{-\frac{1}{0,32}} = 2,76[m]$$

kde:

$X_{2_{-5let}} - X_2$ pro tepelný výkon 700 W (50 let skladování VJP)

Stanovení procentuální změny X_2 :

$$X_{-5let} = X_{2_{-5let}} \cdot 2 = 5,52[m]$$

$$\Delta X = \left[\frac{X_{-5let}}{X} \cdot 100 \right] - 100 = \left[\frac{5,52}{5} \cdot 100 \right] - 100 = +10,4[\%]$$

Kde:

X_{-5let} – rozteč dvou ÚOS při změně doby skladování o – 5 let [m]

ΔX – poměrná změna rozteče [%]

Změna rozteče při zvýšení doby skladování o 5 let (prefabrikovaný bentonit):

Rovnice regrese pro řadu 5:

$$y = 48,21 \cdot x^{-0,29}$$

Změna X_2 při zkrácení doby skladování VJP o 5 let:

$$Y_1 = 48,21 \cdot X_{2_{+5let}}^{-0,29} \Rightarrow X_{2_{+5let}} = \left(\frac{Y_1}{48,21} \right)^{-\frac{1}{0,29}} = \left(\frac{38,13}{48,21} \right)^{-\frac{1}{0,29}} = 2,31[m]$$

kde:

$X_{2_{+5let}} - X_2$ pro tepelný výkon 581 W (60 let skladování VJP)

Stanovení procentuální změny X_2 :

$$X_{+5let} = X_{2_{+5let}} \cdot 2 = 4,62[m]$$

$$\Delta X = \left[\frac{X_{+5let}}{X} \cdot 100 \right] - 100 = \left[\frac{4,62}{5} \cdot 100 \right] - 100 \Rightarrow -7,6[\%]$$

kde:

X_{+5let} – rozteč dvou ÚOS při změně doby skladování o + 5 let [m]

Změna rozteče při zkrácení doby skladování o 5 let (práškový bentonit):

Výpočet bude proveden analogicky dle předchozího a grafu 6-8.

Rovnice regrese pro řadu 4:

$$y = 52,79 \cdot x^{-0,41}$$

Výpočet teploty Y_2 :

$$Y_2 = 52,79 \cdot X_2^{-0,41} = 52,79 \cdot 2,5^{-0,41} = 36,25 [^{\circ}\text{C}]$$

kde:

Y_2 – teplota ve vzdálenosti X_2 odpovídající tepelnému výkonu 644 W při zatěsnění ÚOS práškovým bentonitem [$^{\circ}\text{C}$]

Rovnice regrese pro řadu 3:

$$y = 55,38 \cdot x^{-0,41}$$

Změna X_2 při zkrácení doby skladování VJP o 5 let:

$$Y_2 = 55,38 \cdot (X_{2-5\text{let}})^{-0,41} \Rightarrow X_{2-5\text{let}} = \left(\frac{Y_2}{55,38} \right)^{-\frac{1}{0,41}} = \left(\frac{36,25}{55,38} \right)^{-\frac{1}{0,41}} = 2,81 [m]$$

Stanovení procentuální změny X_2 :

$$X_{-5\text{let}} = X_{2-5\text{let}} \cdot 2 = 5,62 [m]$$

$$\Delta X = \left[\frac{X_{-5\text{let}}}{X} \cdot 100 \right] - 100 = \left[\frac{5,62}{5} \cdot 100 \right] - 100 = +12,4 [\%]$$

Změna rozteče při zvýšení doby skladování o 5 let (práškový bentonit):

Rovnice regrese pro řadu 5:

$$y = 50,39 \cdot x^{-0,38}$$

Změna X_2 při prodloužení doby skladování VJP o 5 let:

$$Y = 50,39 \cdot (X_{2+5\text{let}})^{-0,38} \Rightarrow X_{2+5\text{let}} = \left(\frac{Y_2}{50,39} \right)^{-\frac{1}{0,38}} = \left(\frac{36,25}{50,39} \right)^{-\frac{1}{0,38}} = 2,38 [m]$$

Stanovení procentuální změny X_2 :

$$X_{+5\text{let}} = X_{2+5\text{let}} \cdot 2 = 4,76 [m]$$

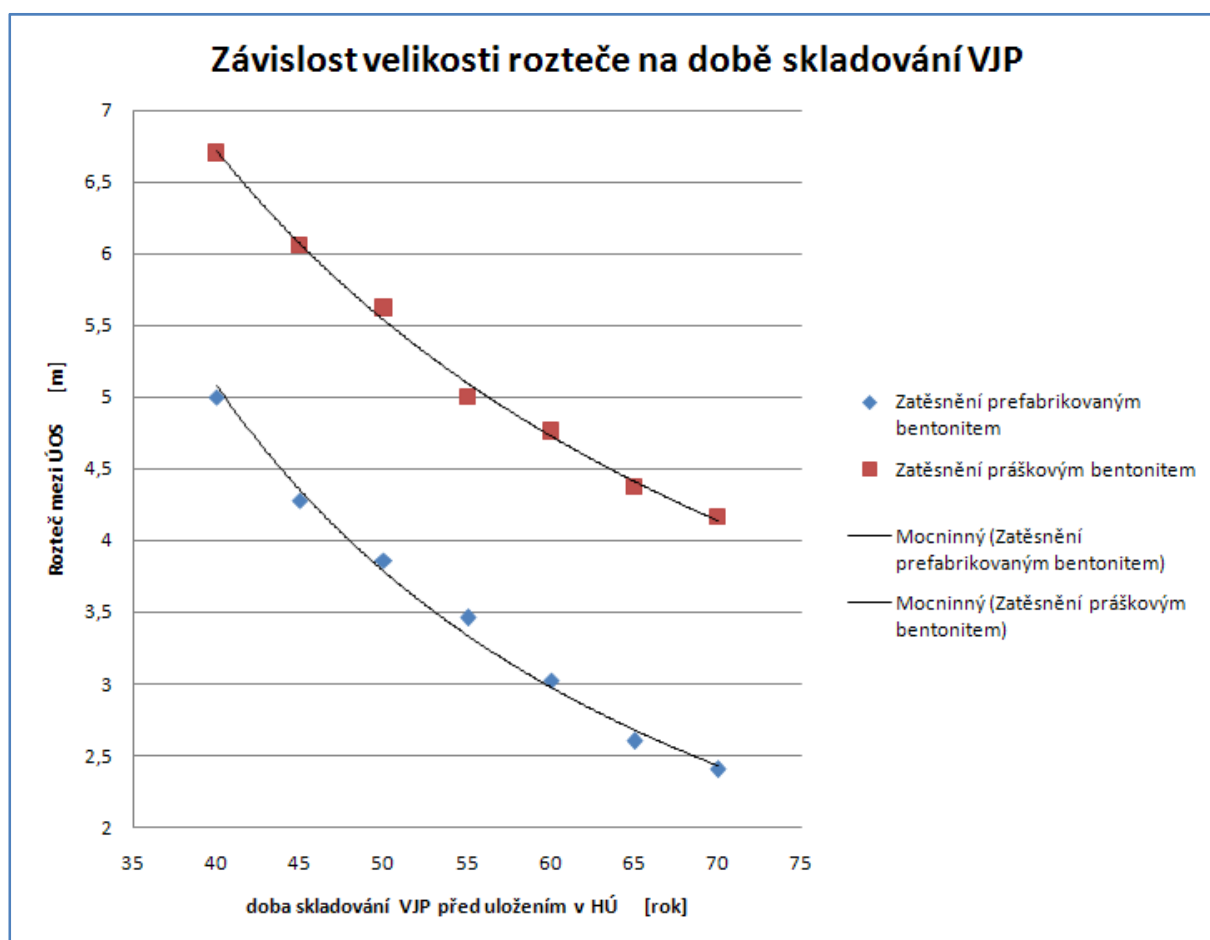
$$\Delta = \left[\frac{X_{+5\text{let}}}{X} \cdot 100 \right] - 100 = \left[\frac{4,76}{5} \cdot 100 \right] - 100 = -4,8 [\%]$$

V následující tabulce 7.1 je zhodnocení výsledků předchozích výpočtů.

Tab. 7.1: Procentuální změna rozteče mezi dvěma ÚOS v závislosti na změně doby skladování a použité formě bentonitu

Změna rozteče (TM) při použití bentonitu ve formě:	Doba skladování VJP před uložením do HÚ		
	-5 let	55 let	+5let
Prášku	+12,4 %	2,5 m	-4,8 %
Prefabrikátů	+10,4 %	2,5 m	-7,6 %

Dále byly dle předchozího postupu vypočteny změny rozteče v rozsahu pro 40 až 70 let skladování VJP. Na základě těchto výpočtů byl vytvořen graf 7.1 závislosti rozteče dvou ÚOS na době skladování VJP před uložením do HÚ a způsobu jeho zatěsnění v ukládacím vrtu. Sklon křivky zobrazující závislost změny rozteče při použití prefabrikovaného bentonitu není úplně korektní. Tento sklon by měl být logicky menší než v případě druhém. Chyba pravděpodobně nastala při nepřesném proložení hodnot získaných z numerického modelu regresní křivkou s nedostatečnou spolehlivostí koeficientu regrese. Autorovi se nepodařilo tuto pravděpodobnou chybu více minimalizovat.



Graf 7.1: Závislost velikosti rozteče na době skladování VJP a druhu použitého zatěsnění vrtu

8 Optimalizace umístění ÚOS v podzemní části HÚ

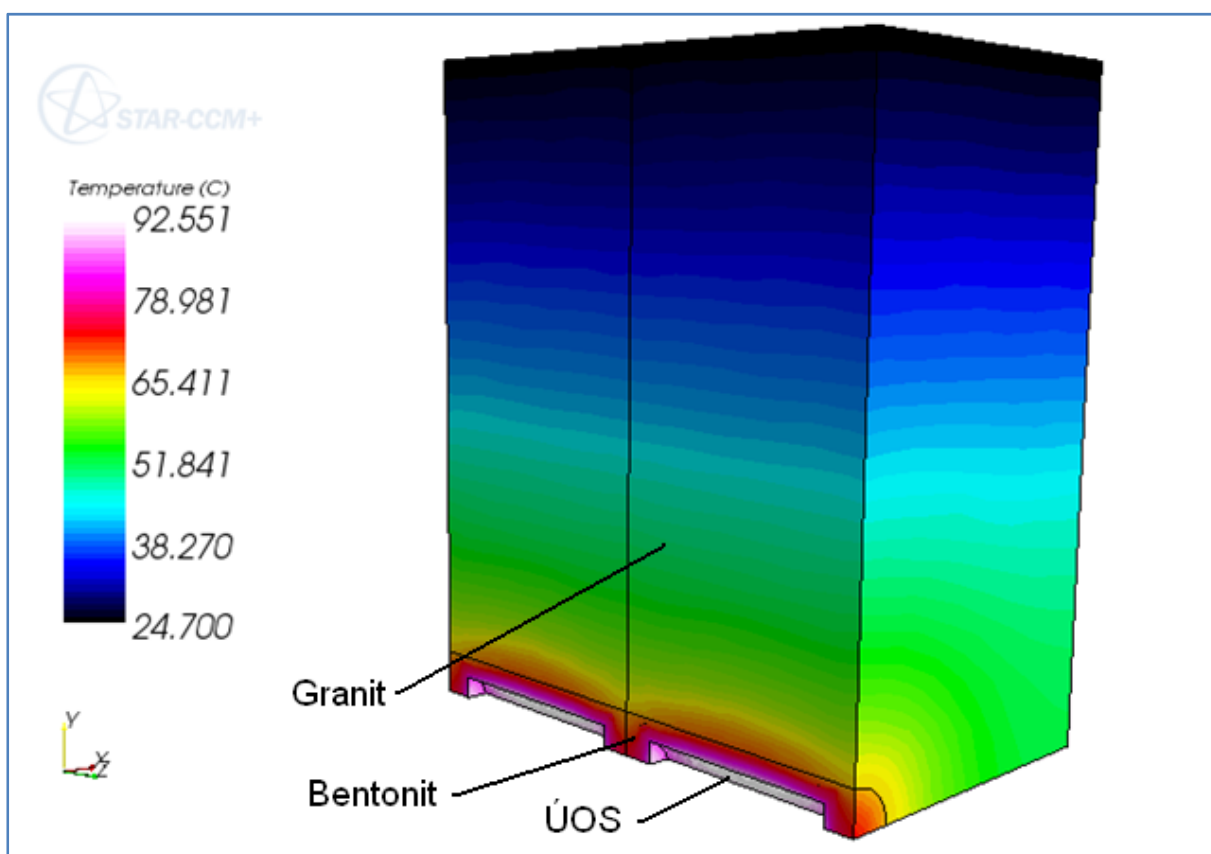
Bude provedena na několika zjednodušených modelech. Tyto zjednodušené numerické modely budou vytvořeny na základě Konceptu 5 (kap. 4.5). Autor si tento koncept vybral, protože horizontování ukládání v ukládacích tunelech s požitím tzv. superkontejneru se zdá velice výhodné. K posouzení optimálního umístění ÚOS, z hlediska přestupu tepla, je nutné porovnat tepelné profily v předchozích zjednodušených modelech. V první variantě budou ÚOS od sebe odděleny vrstvou jednoho metru prefabrikovaného bentonitu a rozteč dvou ukládacích chodeb bude 10 m. V dalších variantách se bude tato rozteč dále zmenšovat. V další části se provede vyjádření změny teploty mezi ukládacími tunely v závislosti na jejich rozteči.

8.1 Varianta 1

V této variantě umístění se uvažuje ÚOS s tepelným výkonem 847 W (40 let skladování VJP). Teplotní profil v okolí ukládacího tunelu byl modelován pro velikosti roztečí ukládacích tunelů 10, 9 a 8 metrů.

8.1.1 Teplotní profil

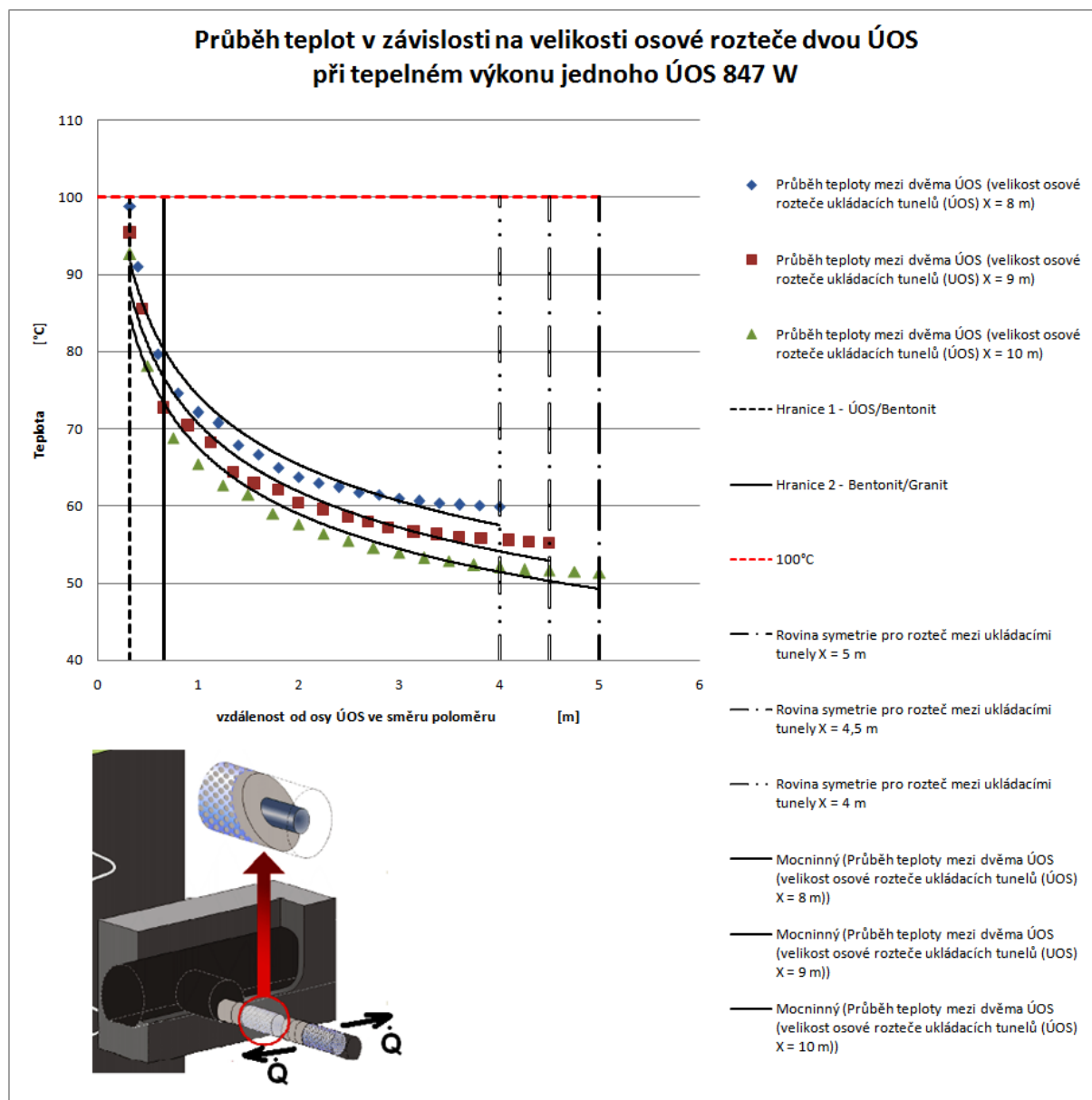
3D model se zobrazením teplotního profilu je na obrázku XX. Model byl koncipován jako 3D těleso. Je to vlastně symetrická čtvrtina části ukládacího tunelu.



Obr. 8.1: Zobrazení teplotního profilu dvou ukládacích pozic

Ve směru osy + Z se táhne ukládací tunel. Směr osy + Y je k zemskému povrchu. Ve směru osy + X jsou ekvidistantně umístěny další ukládací tunely.

Pro zjednodušení byla uvažována délka ÚOS 3,265 m. To je v podstatě přibližně délka části ÚOS produkující tepelný výkon. Model ÚOS byl tedy koncipován jako tzv. „černá skříňka“ jež má jasné dané geometrické parametry a dává neměnnou hodnotu tepelného výkonu. Teplotní profily zjištěné díky tomuto modelu jsou zobrazeny v grafu 8.1.



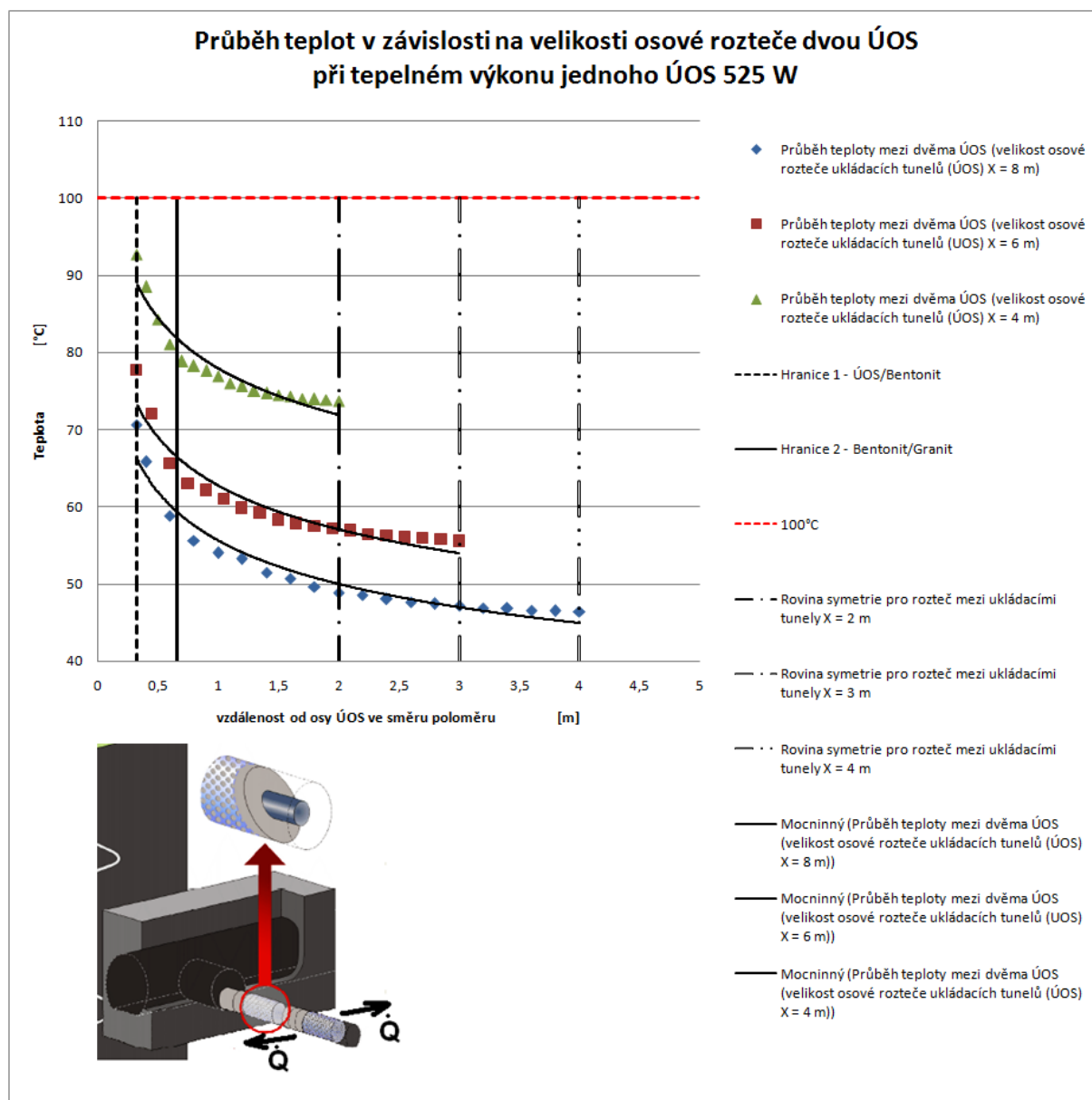
Graf 8.1: Průběh teploty pro velikost rozteče 10, 9 a 8 m při tepelném výkonu 847 W v polovině výšky ÚOS

V levé spodní části grafu je detail způsobu umístění ÚOS v ukládacím tunelu. A dále zobrazení směru tepelného toku od osy ukládacího tunelu (osa ukládacího tunelu je přibližně shodná s osou ÚOS) k sousednímu ukládacímu tunelu. Detail umístění ÚOS byl převzat z [1].

Z předchozího grafu je zřejmé, že při tepelném výkonu 847 W a nejmenší navržené rozteči dvou ukládacích tunelů, nepřekročí teplota na rozhraní ÚOS/Bentonit, limitní hodnotu 100 °C.

8.2 Varianta 2

Z předchozího modelu a kapitoly 7 je zřejmé, že při snížení tepelného výkonu ÚOS dojde ke snížení rozteče mezi dvěma ÚOS. V této variantě se uvažuje nižší hodnota tepelného výkonu ÚOS a to konkrétně 525 W (odpovídá skladování VJP po dobu 65 let). K výpočtu teplotního profilu se použilo předchozího numerického modelu pro tepelný výkon 525 W a hodnoty rozteče 8, 6 a 4 metry. Získané závislosti jsou uvedeny v grafu 8.2.



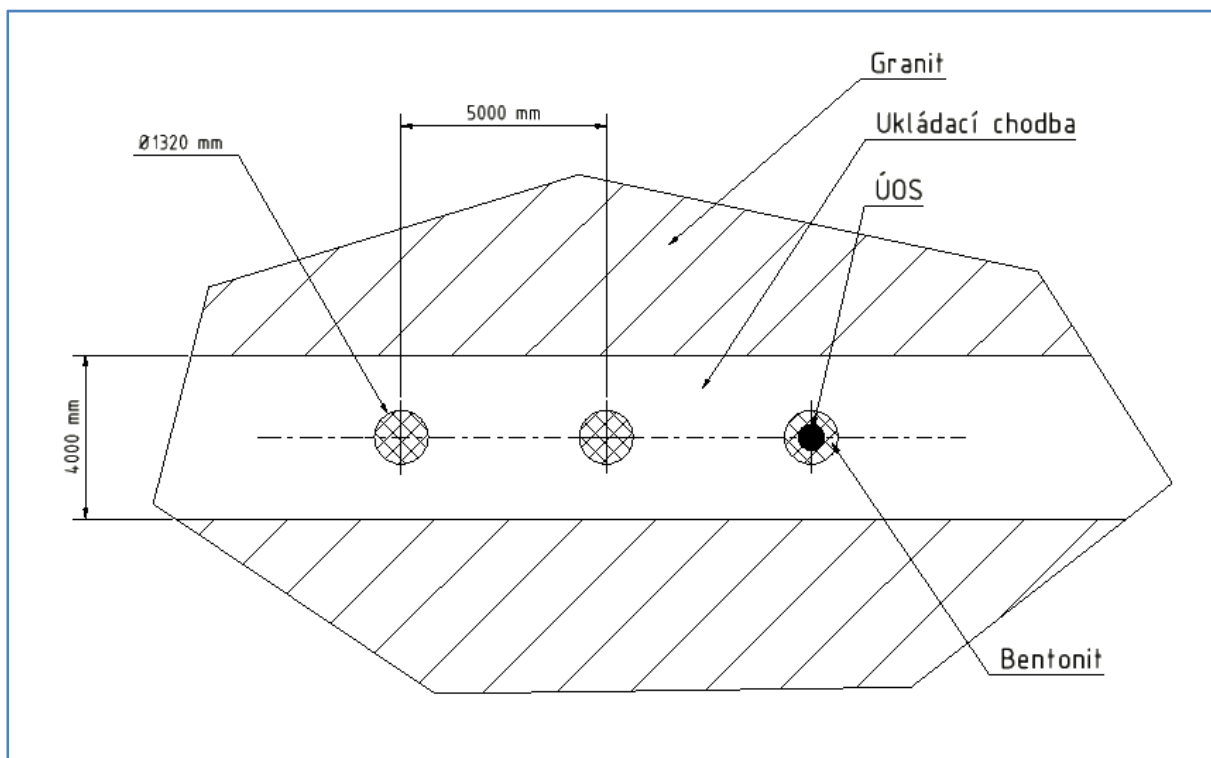
Graf 8.2: Průběh teploty pro velikost rozteče 8, 6 a 4 m při tepelném výkonu 847 W v polovině výšky ÚOS

Detail umístění ÚOS v ukládacím tunelu byl převzat z [1].

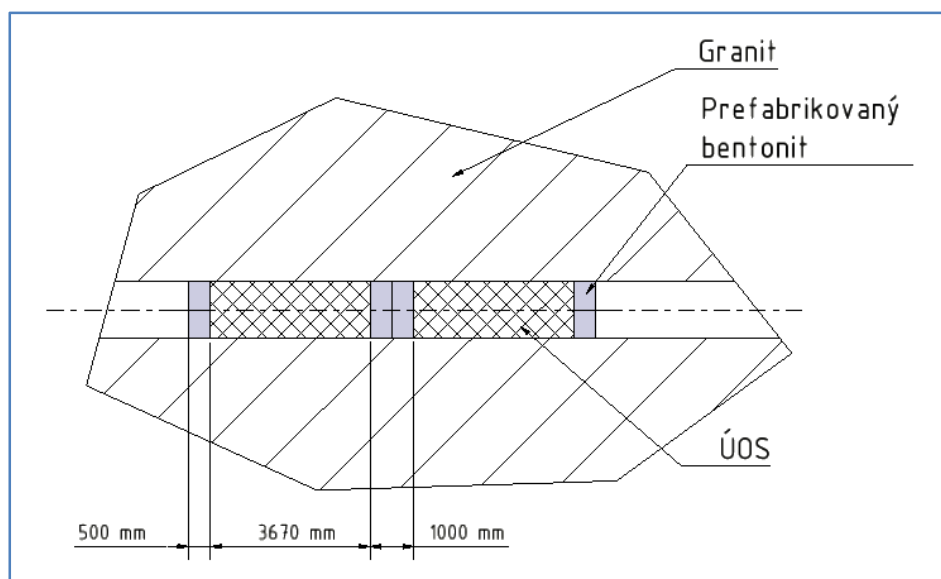
Ze získaných hodnot (graf 8.1) je jasné, že při hodnotě tepelného výkonu 525 W mohou být ÚOS od sebe vzdáleny o méně než 4 m. Při těchto parametrech dosáhne teplota na povrchu ÚOS 92,4 °C.

8.3 Porovnání vertikálního a horizontálního ukládání ÚOS

V případě ukládání ÚOS dle Konceptu 1 (kap. 4.1) popřípadě viz Konceptu HÚ v ČR (kap. 3.2.2) jsou ÚOS ukládány v ukládacích vrtech v podlaze ukládací chodby obr. 8.2. Jiný případ je při uvažování ukládání ÚOS dle Konceptu 5 (kap. 4.5), kde se ÚOS ukládá přímo do ukládací chodby kruhového průřezu. V této části optimalizace umístění bude proveden výpočet množství vyrubaného objemu horniny na jeden uložený ÚOS.



Obr. 8.2: Označení hlavních rozměrů ukládacího tunelu (Konceptu HÚ v ČR)



Obr. 8.3: Označení hlavních veličin rozměrů ukládacího tunelu (Fiktivní HÚ - kombinace ÚOS pro VVER 400 a přibližného návrhu ukládání ÚOS dle Konceptu 5 v kap. 4)

8.4 Porovnání množství objemu vyrubané horniny

Přibližné rozměry ukládacích chodeb jsou vypsány v tabulce 8.1.

Tab. 8.1: Přibližné rozměry ukládacích chodeb pro jednotlivé koncepce[4]

	A = šířka	B = výška	C = délka
HÚ v ČR	4000 m	10500 m	200 m
Fiktivní HÚ	Uvažuje se kruhový průřez o průměru 1,32 m		200 m

Z obr. 8.2 a tab. 8.1 je možné vypočítat přibližnou velikost objemu vyrubané horniny připadající na jeden ÚOS.

Koncepce HÚ v ČR:

Celkový objem vyrubané horniny z ražby ukládací chodby:

$$V_{UCH_1} = A \cdot B \cdot C = 4 \cdot 10,5 \cdot 200 \doteq 4020 [m^3]$$

Množství objemu vyrubané horniny z ukládacích vrtů:

$$V_{UV_1} = \pi \cdot r^2 \cdot L_V \cdot S = \pi \cdot 0,66^2 \cdot 4,067 \cdot 39 \doteq 217 [m^3]$$

kde:

S_1 – počet ÚOS které bude možno uložit v ukládací chodbě o délce 200 m, s uvážením ukládání ve vertikálních vrtech, kde prvního ÚOS bude od krajní části ukládací chodby odsazen o 5 metrů z obou stran. [-]

L_V – hloubka vrtu kruhového průřezu [m]

Celkové přibližné množství vyrubaného objemu připadajícího na jeden ÚOS:

$$V_{celk_1} = \frac{V_{uch_1} + V_{uv}}{S_1} = \frac{4020 [m^3] + 217 [m^3]}{39 [1]} \doteq 108,6 \left[\frac{m^3}{\text{ÚOS}} \right]$$

Fiktivní koncepce HÚ:

Celkový objem vyrubané horniny z ražby ukládací chodby:

$$V_{UCH_2} = \pi \cdot r^2 \cdot c = 4 \cdot 0,66^2 \cdot 200 \doteq 348,5 [m^3]$$

Celkové přibližné množství vyrubaného objemu připadajícího na jeden ÚOS:

$$V_{celk_2} = \frac{V_{uch_2}}{S_2} = \frac{348,5 [m^3]}{\sim 42 [1\text{ÚOS}]} \doteq 8,3 \left[\frac{m^3}{1\text{ÚOS}} \right]$$

kde:

S_2 – počet ÚOS které bude možno uložit v ukládací chodbě o délce 200 m, s uvážením horizontálního způsobu ukládání, kde prvního ÚOS bude od krajní části ukládací chodby odsazen o tloušťku první bentonitové výplně. Viz obr. 8.3.

8.5 Dílčí závěr

Z první části této kapitoly je zřejmé, že teplotní profil se při horizontálním ukládání v ukládací chodbě, bude měnit velmi výrazně. Z grafu 8.1 a 8.2 je vidět, že při rozteči 8 m mezi dvěma ukládacími tunely, se při změně tepelného výkonu z 847 W na 525 W změní teplota na povrchu ÚOS přibližně o - 25 °C. Tudíž při dodržení limitní hodnoty na rozhraní ÚOS/Bentonit, při tomto tepelném výkonu, by bylo možné, z hlediska přestupu tepla, minimalizovat osovou vzdálenost dvou sousedních tunelu na hodnotu 4 metrů.

V části týkající se porovnání těchto zmíněných způsobů ukládání ÚOS, byly zjištěny tyto fakta. Celkové přibližné množství vyrubaného objemu připadajícího na jeden ÚOS, při uvažování vertikálního ukládání, je více jak desetinásobně větší, než při použití horizontálního způsobu ukládání. Toto je zapříčiněno převážně tím, že při ukládání není zapotřebí s ÚOS jakkoliv manipulovat, popřípadě jej otáčet. A také díky tomu, že ÚOS se umísťuje přímo do ukládací chodby, oproti prvnímu způsobu, kde se ÚOS ukládá do vertikálních vrtů v ukládacích chodbách.

9 Závěr

9.1 Diskuze k přestupu tepla v ÚOS

Dle kapitoly 3, se zdá výhodné použití konceptu ÚOS pro HÚ v ČR. Jeho porovnáním s velmi rozdílným finským konceptem, vzniká mnoho otázek. Například odůvodněné použití antikoroziního pláště tloušťky 1 mm oproti velmi robustnímu měděnému vnějšímu přebalu, který by měl být schopen odolávat korozi po více než 100000 let.

Je zřejmé, že česká koncepce se snaží minimalizovat v uvažovaném návrhu spotřebu materiálu, zejména pak barevných kovů. Tímto se stává ÚOS pro VJP z VVER 440 JEDU, velmi zajímavým řešením, jak z hlediska cenového, tak i kompaktnosti a hmotnosti.

Největší nejasností této koncepce, pravděpodobně zůstává antikoroziní povlak. A to konkrétně schopnost odolávat účinkům koroze v dlouhodobém hledisku v podmínkách blízkých reálnému prostředí.

Bude nutné provést několika variant zjednodušených modelů, které bude nutno co nejvíce přibližovat modelu reálnému. Na těchto variantách bude nutno provést experimentální výzkumy, které se budou svými vlastnostmi blížit reálnému prostředí.

Dále dle kap. 6 bylo zjištěno, že změny teploty na povrchu ÚOS, je možno dosáhnout v první řadě změnou tepelného výkonu ÚOS, volbou materiálu, tudíž změnou součinitele tepelné vodivosti a nakonec také změnou tloušťky stěny ÚOS.

Změna teploty na povrchu ÚOS v čase, díky poklesu jeho tepelného výkonu, je zřejmá z grafu 6-4 a v podstatě kopíruje závislost poklesu graf 6-3 změny tepelného výkonu ÚOS v čase.

Změna teploty na povrchu ÚOS pomocí součinitele tepelné vodivosti je prakticky nulová. Dle kap. 6.5.3 se ukázalo, že pokud se uvažuje konstantní výkon, pak se zvyšováním hodnoty součinitele tepelné vodivosti, roste i teplota na povrchu ÚOS. Toto je dáno velmi malým součinitelem odporu proti vedení tepla. Při snižování součinitele λ , dochází k s neováním teploty na povrchu ÚOS. V obou případech je změna teploty velmi malá

Změna teploty na povrchu ÚOS pomocí parametru Δ_i , byla provedena velmi zjednodušený model. A to konkrétně ÚOS odpovídací rozměrům skutečného ÚOS, s tím rozdílem, že byla použita pouze jedna stěna, odpovídající tloušťce stěn v prvním zjednodušeném modelu. Následně bylo zjištěno, že změna teploty na povrchu ÚOS zvětšením průměru ÚOS, je velmi malá. Pokud by se tato varianta uvažovala, pravděpodobně nepřinese žádné výhody.

Pro důkladné prozkoumání teplotního profilu v ÚOS a na jeho povrchu, je nutné vypracovat další zjednodušené modely, které bude nutno neustále přibližovat reálné situaci. Nicméně pro pochopení dalších problémů souvisejících s přestupem tepla v ÚOS, nenutné a nezbytné vypracování experimentální výzkumu, v oblastech s přibližně velmi shodnými podmínkami jako v uvažované lokalitě HÚ.

9.2 Diskuze k numerickému modelu

Dle kap. 6.6 byl vytvořen numerický model, zjednodušeného řešení přestupu tepla z ÚOS do těsnicí vrstvy a dále pak do geosféry. Podrobný popis tvorby modelu až po výstupní hodnoty, je v kap. 6.6 popsán.

Autor by zde chtěl vytknout několik problémů, ke kterým může při tvorbě toho zjednodušeného modelu dojít.

Jelikož se uvažuje, že tepelný tok teče ve všech směrech, je nutné při jeho zadávání vždy užívat měrný tepelný tok, vztažený na jednotku plochy. V některých případech, např. při velmi detailním vytvoření modelu (PK má šestiúhelníkový profil), může dojít k velkým komplikacím a časové náročnosti, při zadávání a přepočtu tohoto toku pro příslušné plochy 3D modelu.

V tomto případě, autor považuje zjednodušení objemového zdroje tepla dle 6.3.1 a obr. 6-5, za velmi výhodné. Přičemž se dá předpokládat, že teplotní profil nebude až tak odlišný, od modelu s korektní geometrií.

Bylo také zjištěno, že v tomto modelu je problémové nastavení neovlivněné teploty (tzv. infinite boundary – podmínka v nekonečnu), například teploty která by byla v podzemní části HÚ, při neuvažování tepelných zdrojů. Vzdálenost této teploty je možno navrhnout a uvážit do modelu. Pokud by bylo zapotřebí vytvořit velmi přesný model, je toto prakticky nemožné. Hlavně z hlediska náročnosti výpočetní techniky.

9.3 Diskuze k návrhu rozteče

Z kap. 7 a 8 je zřejmé, že se změnou rozteče mezi dvěma ÚOS se mění teplotní profil mezi nimi. Tím dochází v prvním případě také ke změně teploty na rozhraní ÚOS/Bentonit viz graf 8.1 a 8.2.

Tento teplotní profil je dále možné ovlivnit druhem použitého zatěsnění ÚOS v ukládacím vrtu. Při použití bentonitu ve formě prášku, se dle grafu 8.2 zvýší i teplota na povrchu ÚOS. Toto je způsobeno, především přerozdělením tepelného toku. Ten díky nízké hodnotě součinitele tepelné vodivosti (velký odpor proti vedení tepla), se bude stáčet k částem modelu s vyšší tepelnou vodivostí (menší odpor proti vedení tepla).

Např. při vertikálním ukládání ÚOS, při zatěsnění vrtu bentonitem ve formě prášku (namísto prefabrikovaného bentonitu), dojde ke zmenšení velikosti tepelného toku v radiálním směru (oblast s větším podílem bentonitu, např. oproti horní a dolní části ÚOS) a ke zvýšení tepelného toku v axiálním směru.

Použití práškového bentonitu je možno jen do určitých velikostí ukládacích roztečí a hodnot tepelných výkonů graf 8-2. a 7-1. Použití prefabrikovaného bentonitu v oblasti ukládacího vrtu, je z těchto hledisek podstatně výhodnější.

Seznam použité literatury

- [1] *SÚJB : Nakládání s vyhořelým jaderným palivem (VJP)* [online]. 1999 [cit. 2009-02-05]. Dostupný z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=544>.
- [2] *SÚRAO : Referenční projekt - Technologická část* [online]. 1999 [cit. 2009-03-12]. Dostupný z WWW: <http://proe.cz/surao2/index.php?Lang=CS&r=d_projekt>.
- [3] *Wikipedia : Nuclear fuel cycle* [online]. 2000 [cit. 2009-02-17]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel_cycle>.
- [4] *SÚRAO : Referenční projekt - Stavební část* [online]. 1999 [cit. 2009-03-12]. Dostupný z WWW: <http://proe.cz/surao2/index.php?Lang=CS&r=d_projekt>.
- [5] VAŠÍČEK, Jiří, STARÝ, Oldřich, DUDA, Vítězslav. *Časopis Energetika : Ekonomické aspekty nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem* [online]. 2003 [cit. 2009-02-17]. Dostupný z WWW: <http://www.volny.cz/casopis.energetika/e_7802_1.html>.
- [6] *SÚRAO : Referenční projekt – Souhrnné řešení stavby* [online]. 1999 [cit. 2009-03-12]. Dostupný z WWW: <http://proe.cz/surao2/index.php?Lang=CS&r=d_projekt>.
- [7] EGP , Invest. Výkresy technologické části PS 01. *Výkresová dokumentace* [online]. 1999 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <http://proe.cz/surao2/publikace/c11_techicka_zprava_ps01_vykresy.pdf>. SÚRAO
- [8] *SÚRAO : Referenční projekt – Průvodní zpráva* [online]. 1999 [cit. 2009-03-12]. Dostupný z WWW: <http://proe.cz/surao2/index.php?Lang=CS&r=d_projekt>.
- [9] *EU a energetika : Hlubinné ukládání jaderného odpadu* [online]. 2001 [cit. 2009-02-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.energetika-eu.cz/ukladani-jaderneho-odpadu.htm>>.
- [10] RAIKO, Heikki. Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel : Design Report. *Report* [online]. 2005, 0, no. 2 [cit. 2009-02-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.posiva.fi/files/281/Posiva2005-02web.pdf>>.
- [11] Geological Disposal Options for High-Level Waste and Spent Fuel. *Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority* [online]. 2008 [cit. 2009-02-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-Options-for-High-Level-Waste-and-Spent-Fuel-January-2008.pdf>>.
- [12] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. [s.l.] : Skripta VUT, 2001. 215 s.
- [13] Inconel 600. *Materiálový list* [online]. 2005 [cit. 2009-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.espimetals.com/tech/inconel600.pdf>>.
- [14] *Accuratus : Aluminum Oxide, Al₂O₃* [online]. 2002 [cit. 2009-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://www accuratus.com/alumox.html>>.
- [15] *Matbase : Non-ferrous Metals - Wrought Aluminium* [online]. 2002 [cit. 2009-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.matbase.com/material/non-ferrous-metals/wrought-aluminium/almgisi0.5-6060/properties>>.

- [16] TOTEMEYER, Terry. *Smithells Metals Reference Book : Eighth Edition*. [s.l.] : [s.n.], 2004. 2112 s. Dostupný z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=717>. ISBN 978-0-7506-7509-3.
- [17] ASTM 302-304-304L-305 : Alloy technical data sheet. *Materiálový list* [online]. 2005 [cit. 2009-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.dosamet.com/datasheets/ASTM302-304-304L-305.pdf>>.
- [18] *Struktura a vlastnosti grafitických litin : Litiny s kuličkovým grafitem* [online]. 2006 [cit. 2009-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=11>>.
- [19] *Struktura a vlastnosti grafitických litin : Litina s lupínkovým grafitem* [online]. 2006 [cit. 2009-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=10>>.
- [20] Manual for Star-CCM++. *Help book* [online]. 2004 [cit. 2009-04-13].
- [21] BLÜMLING, P. The Excavation-Damaged Zone in Clay Formations : Time-dependent Behaviour and Influence on Performance Assessment. *Technical report* [online]. 2006 [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.euridice.be/downloads/EDZpaperTours-final.pdf>>.

Zkratky

HLW	zbytky z přepracování jaderného paliva
HÚ	hlubinné úložiště
PC	palivový cyklus
PK	palivová kazeta
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
ÚOS	úložný obalový soubor
VJP	vyhořelé jaderné palivo
VRAO	vysoce radioaktivní odpady

Seznam symbolů

a	součinitel teplotní vodivosti [m^2/s]
A	šířka ukládací chodby [m]
B	výška ukládací chodby [m]
d_{ekviv}	průměr ekvivalentního válcového zdroje tepla [m]
C	délka ukládací chodby [m]
δ	tloušťka tělesa ve směru tepelného toku [m]
L	uvažovaná délka ÚOS [m]
λ	součinitel tepelné vodivosti [W/mK]
L_V	hloubka vrtu v ukládacím tunelu kruhového průřezu [m]
m	hmotnost [kg]
\dot{Q}	tepelný tok [W]
\dot{q}	měrný tepelný tok [W/m^2]
ρ	hustota [m^3/kg]
ΣR	suma odporů proti vedení tepla [K/W]
S_1	počet ÚOS které bude možno uložit v ukládací chodbě o délce 200 m, s uvažováním vertikálního způsobu ukládání [-]
S_2	počet ÚOS které bude možno uložit v ukládací chodbě o délce 200 m, s uvažováním horizontálního způsobu ukládání [-]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
T_6	teplota na povrchu ÚOS [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{stř}$	střední teplota ve válcové stěně [$^{\circ}\text{C}$]
V_{celk}	celkové přibližné množství vyrubaného objemu připadajícího na jeden ÚOS [$\text{m}^3/\text{ÚOS}$]
V_{UCH}	celkový objem vyrubané horniny z ražby ukládací chodby [m^3]
V_{UV}	množství objemu vyrubané horniny z ukládacích vrtů [m^3]
X	délka rozteče mezi dvěma ÚOS [m]
X_2	$\frac{1}{2}$ délky rozteče mezi dvěma ÚOS [m]
X_{-5let}	rozteč dvou ÚOS při změně doby skladování o – 5 let [m]
X_{+5let}	rozteč dvou ÚOS při změně doby skladování o + 5 let [m]
ΔX	procentuální změna rozteče [m]